

# Die Aetherhypothesen

von

Descartes bis Fresnel,  
ihr Inhalt und ihre Entwicklung.



II. Teil.

Newton, Young und Fresnel.

Von Dr. P. Beda Anderhalden O. S. B.





# Die Ätherhypothese

von

Descartes bis Fresnel

im Inhalt und ihre Entwicklung

II. Teil

Newton, Young und Fresnel

Von Dr. P. Beda Andenhold O. S. B.





## I. Kapitel.

# Die Stellung Newtons zur Aetherhypothese.<sup>1)</sup>

---

Seitdem die Emissionstheorie des Lichtes am Anfang des 19. Jahrhunderts der Undulationstheorie hat weichen müssen, bietet sie nur mehr historisches Interesse und, nachdem man jetzt ihre Unhaltbarkeit erkannt hat, mag man sich fragen, wie es denn möglich war, dass sie dennoch ein Jahrhundert lang die Geister gefangen hielt. Der Grund dieser seltsamen, aber in der Geschichte der Wissenschaft nicht einzig dastehenden Erscheinung ist einerseits die grössere Anschaulichkeit der Emissionstheorie, so lange man nicht zu viel von ihr verlangt, anderseits aber das Ansehen Newtons. Als sich jedoch das Beobachtungsmaterial mehrte und die Erklärung der verschiedenen Erscheinungen immer verwickelter wurde, da zeigten sich die Schwächen der Emissionstheorie, da sie bald so viele Hilfhypothesen aufstellen musste, als sie Dinge erklären wollte.

In der Emissionstheorie hat der Aether keine Bedeutung. Newton war zeitweise Anhänger sowohl der Undulations- wie der Emissionstheorie, oder suchte beide Theorien miteinander zu vereinigen, und daher rühren seine oftmaligen Aeusserungen über Existenz und Eigenschaften des Aethers.

Diese Aeusserungen, die sich hauptsächlich im fragmentarischen Anhang zu seinem grossen optischen Werke finden, gaben den Anlass, eine Art Ehrenrettung des grossen Newton zu versuchen, und werden gewöhnlich als Beweis herangezogen, dass er kein vollständiger Gegner der Undulationstheorie war. Es dürfte jedoch einleuchtend sein, dass derartige, aus dem Zusammenhang herausgerissene Sätze auch nicht einmal annäherungsweise ein richtiges Bild von seiner Stellung zur Undulationstheorie und zur Aetherhypothese zu geben vermögen. Um diese Stellung einigermaßen richtig zu beurteilen, ist es durchaus notwendig, dass man die diesbezüglichen Aussprüche mit seinem wissenschaftlichen Entwicklungsgange und seinen Errungenschaften in Beziehung bringt.

In der Stellung Newtons zur Aetherhypothese heben sich mit ziemlicher Deutlichkeit zwei Perioden ab. Die erste reicht von seinem ersten wissenschaftlichen Auftreten bis zur Zeit, wo er die Prinzipien zu bearbeiten begann (1672—1679), und ist gekennzeichnet durch ein ziemlich starkes Hinneigen zur Aetherhypothese. Die zweite Periode umfasst die Zeit von 1679 bis zum Schlusse seiner schriftstellerischen Tätigkeit und charakterisiert deutlich seine gegnerische Stellung zur Aetherhypothese. Mit der zweiten Ausgabe der „Optik“ scheint eine neue Periode zu beginnen, die wiederum ein gewisses Hinneigen zur Aetherhypothese erkennen lässt. Aber nach Rosenberger stammt das dort angeführte Material zumeist aus viel früherer Zeit, d. h. aus der ersten Periode.<sup>2)</sup>

Newton trat im Jahre 1672 mit seiner Erstlingsarbeit „Ueber die Natur des Lichtes und der Farben“ (A new theory about Light and Colours) hervor. Die nicht umfangreiche

<sup>1)</sup> Der erste Teil dieser Arbeit erschien als Beilage zum Jahresbericht 1900/1901 und behandelte in drei Kapiteln die vor Descartes ausgesprochenen Anschauungen vom Aether, Descartes und seine Schule, den Aether in der Undulationstheorie bis Euler. Das dort vorausgeschickte Literaturverzeichnis enthält auch die in diesem zweiten Teile citierten Werke.

<sup>2)</sup> Rosenberger, Newton und seine physikalischen Prinzipien, Seite 310.



Schrift enthält als vorzüglichsten Gegenstand die Zusammensetzung des weissen Lichtes. Schon da erkennt man die eigentümliche Schreibweise, die ihm zeitlebens geblieben ist. Er gibt qualitativ und quantitativ mit peinlichster Sorgfalt und hervorragendem Geschick untersuchte Tatsachen; Mutmassungen über ihre Ursache werden selten und dann stets mit gehöriger Reserve gegeben. Am Schlusse der Abhandlung lässt Newton durchblicken, dass er das Licht für einen Stoff halte.<sup>1)</sup>

R. Hooke, den wir als Vorläufer Huygens' schon kennen gelernt haben, wurde mit der Prüfung der Arbeit Newtons betraut und trat in der Folgezeit als sein Gegner auf.

Wenn nun schon die erste Arbeit Newtons und alle folgenden das Fehlen jeden Hinweises auf die historische Entwicklung und die Unabhängigkeit von den Ideen und Meinungen Anderer als charakteristisches Merkmal zur Schau trugen, so glauben wir doch, dass gerade die Polemik mit Hooke ihn veranlasst hat, sich die Undulationstheorie und die Aetherhypothese gründlich anzuschauen und bei diesem Studium auch ihre Vorteile zu erkennen. Newton antwortete im Juni 1672 auf die Einwürfe Hookes und äusserte sich bei diesem Anlass zum ersten Mal über den Aether und die Undulationstheorie.

Hooke hatte (und wohl nicht mit Unrecht) aus der Schrift Newtons den Schluss gezogen, dass dieser die Materialität des Lichtes lehre. Dagegen wandte Newton ein, er neige allerdings zur Ansicht, dass das Licht ein Körper sei; mit Absicht und Nachdruck habe er aber das Wort „vielleicht“ beigesetzt, welches Hooke ganz übersehen habe<sup>2)</sup>. Weil nach seiner (Newtons) Ansicht die von ihm beschriebenen Erscheinungen sich auch nach anderen Hypothesen erklären liessen, habe er es absichtlich vermieden, die eigene Erklärung auf eine derselben zu stützen. Uebrigens unterscheide sich seine und Hookes Hypothese gar nicht so sehr: Die Schwingungen des Aethers seien in beiden gleich nützlich und notwendig. Sodann zeigt er, wie man die Farben nach der Aetherhypothese erklären könne. Die leuchtenden Körper erregen Schwingungen verschiedener Grösse, die vereint ins Auge gelangend, den Eindruck des Weiss hervorrufen. Geschieht auf irgendwelche Weise eine Trennung der Wellen, so erregen die längeren das Rot, die kürzeren das Violett und die dazwischen liegenden Wellen auch die entsprechenden Farben zwischen dem Rot und Violett.

Sehr bemerkenswert ist Newtons Erklärungsversuch der Dispersion des Lichtes. Da nämlich grössere Schwingungen einen Widerstand leichter überwinden als kleinere, so werden sie in einem brechenden Medium weniger von ihrer Richtung abgelenkt als die kleineren. Die roten Strahlen sind also, weil durch die längsten Wellen erzeugt, die am wenigsten brechbaren, die violetten Strahlen aber, weil durch die kleinsten Wellen erzeugt, die am meisten brechbaren. Allgemein werden also durch ein brechendes Medium Wellen verschiedener Länge getrennt. Die Bedingung der Dispersion des Lichtes ist also in der verschiedenen Wellenlänge des zusammengesetzten Lichtes zu finden.<sup>3)</sup>

Treffend bemerkt hiezu Rosenberger: „Die Anhänger der Undulationstheorie wären Newton eigentlich damals zu grossem Dank verpflichtet gewesen; denn er hatte bei dieser

<sup>1)</sup> Corpora pro substantiis non haberentur sine sensibilibus eorum qualitibus; et harum præcipua (die Farbe) cum nunc reperiatur pertinere ad aliquid aliud (dem Lichtstrahl), hoc ipsum sane non immerito substantiam credere possumus. Opusc. phil. Tom. II, p. 292.

<sup>2)</sup> Newton sagt an der angezogenen Stelle: „Quæ cum ita sint, amplius non disputabitur, utrum colores in tenebris existant; utrum visorum objectorum qualitates sint; neque forsitan, utrum lux sit corpus“ Opusc. Phil. Tom. II, p. 291.

<sup>3)</sup> Es verdient hervorgehoben zu werden, dass selbst die neueren Dispersionsformeln die Grösse der Dispersion für dasselbe brechende Mittel als Funktion der Wellenlänge darstellen; so z. B. die Formel von Cauchy und die, welche die elektromagnetische Lichttheorie für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen elektrischer Kraft in Halbleitern ableitet.



Gelegenheit unbestritten zum ersten Male gezeigt, wie man auf Grund der Undulationstheorie zu einer bestimmten Definition der Farben und zu einer Erklärung der Dispersion des Lichtes bei der Brechung kommen könne.<sup>1)</sup>

Ausser der Erklärung der Dispersion finden sich in der genannten Schrift Newtons eine Reihe von Erscheinungen angeführt, die sich alle durch verschieden grosse Aethervibrationen erklären liessen. Newton schliesst dann seine Auseinandersetzungen mit der charakteristischen Bemerkung: „Wie nützlich die Aethervibrationen für die Erklärung aller dieser Erscheinungen sind, mögen gerade diejenigen bedenken, die der Ansicht sind, man müsse die Erscheinungen aus der Aetherhypothese erklären.“<sup>2)</sup>

Mit diesem Satze hatte Newton (wie er es überhaupt liebte) den Schein von sich abgelenkt, als ob er die Aetherhypothese für die richtige halte. Nichtsdestoweniger lassen uns die in dieser Arbeit enthaltenen Ideen ahnen, welche Fortschritte die Undulationstheorie gemacht haben würde, wenn ihr Autor sich auch in der Folgezeit mit seiner grossen Geisteskraft ihr gewidmet hätte.

Uebrigens müssen wir zum Verständnisse der damals schon so reservierten Stellung Newtons hervorheben, dass er im erwähnten Schreiben schon einen schweren Einwurf gegen die Undulationstheorie vorgebracht hat. Er sagt daselbst: „Mir scheint selbst Hookes fundamentale Annahme unmöglich, nämlich, dass die Wellen oder Vibrationen einer Flüssigkeit in geraden Linien fortgepflanzt werden, ohne immerwährend nach allen Richtungen in das ruhende Medium, durch welches sie begrenzt werden, einzubiegen und sich auszubreiten. Ich müsste mich sehr irren, wenn da nicht Experiment und Demonstration zum Gegenteil führten.“<sup>3)</sup>

Erst im Jahre 1675 erfahren wir wieder weiteres über Newtons Ansichten bezüglich des Aethers, wobei es auffällt, dass seine Ideen viel kühner geworden sind.

Im genannten Jahre übersandte Newton dem Sekretär der Royal Society, Oldenburg, eine von früher her stammende Abhandlung, die er aber vor der Aushändigung noch einmal durchgesehen und teilweise verbessert hatte. Darin findet sich eine Hypo-

<sup>1)</sup> Rosenberger, Newton, S. 82.

<sup>2)</sup> Opusc. phil. Tom. II, p. 339—341.

<sup>3)</sup> Opusc. phil. Tom. II, p. 341, 342. — Später hat sich Newton viel mit der Diffraction des Lichtes beschäftigt und sie im letzten Buche seiner Optik beschrieben. Gerade bei der Diffraction tritt eine Erscheinung auf, welche zeigt, dass das Licht wirklich von der geraden Linie abbiegt. Wir meinen die inneren Fransen. Fresnel ist der Ansicht, Newton habe diese nicht beobachtet, wundert sich aber, dass sie einem solchen Experimentator hätten entgehen sollen. Er gibt daher dem Verdachte Ausdruck, dass seine theoretischen Vorurteile ihm die Erscheinungen nicht beachten liessen, die imstande gewesen wären, den oben erwähnten Einwurf gegen die Undulationstheorie, den er auch später noch aufrecht erhalten hat, zu entkräften. Oeuvres de Fresnel, Tom. II, p. 8. — Einen andern Einwurf gegen die Undulationstheorie entnahm Newton später dem Phänomen der totalen Reflexion. Wäre das Licht eine Vibrationsbewegung des Aethers, wie wäre es dann möglich, fragt er, dass in einem Prisma sich eine Wellenbewegung fortpflanzen könnte, ohne nach aussen zu treten: wie wäre es ferner möglich, dass die Grenzschicht des Prismas durch diese Bewegungen des Aethers erschüttert werden könnte, ohne dass sich die Bewegung dem äusseren Aether mittheile und deshalb Licht nach aussen treten und zum Auge gelangen müsste? Der Einwurf war zur Zeit, wo man das Prinzip der Interferenz noch nicht kannte, nicht unbedeutend. Fresnel zeigte dann später, dass die Vibrationen, welche die Trennungsfläche des dichteren Mediums gegen das dünnere, dem äusseren Aether mittheilt, sich gegenseitig zerstören, wenn

$$\sin i > \frac{v_2}{v_1}$$

d. h. in allen Fällen, wo totale Reflexion stattfindet. Fresnel, Oeuvres, Tom. II, p. 176—180. — Mit der erstgenannten Schwierigkeit ist die Frage identisch: Auf welche Weise kann denn Schatten vorhanden sein? Der Schall geht frei um eine Ecke herum; warum nicht auch das Licht? W. Herschel hat dann darauf hingewiesen, dass auch beim Schall die seitliche Ausbreitung viel geringer sei als die direkte. Und weiter sagt er, dass, wenn überhaupt ein Unterschied in der Stärke der Fortpflanzung in direkter und lateraler Richtung bei den Schwingungen eines elastischen Mittels stattfindet, derselbe aus der Beschaffenheit des Mittels entstehen müsse, aus dem Verhältnisse der Grösse der Schwingungen der einzelnen Theilchen zu ihrem gegenseitigen Abstand, und es würde nicht ungereimt sein, den Aether von solcher Beschaffenheit anzunehmen, dass die Seitenfortpflanzung verhältnissmässig gering ausfällt. Die Einwürfe Newtons und seiner Anhänger beruhten demnach auf unpassenden Begriffen von der Natur elastischer Flüssigkeiten und ihrer Schwingungsgesetze, ganz abgesehen davon, dass sich dass Licht wirklich etwas in den Schatten hinein biegt, wie die Beugungserscheinungen zeigen. W. Herschel, Vom Licht, S. 300.



these über das Wesen des Lichtes, die auf einer Vereinigung der Emissions- und Undulationstheorie beruht.<sup>1)</sup>

Newton sagt darin, er halte die Hypothese, nach welcher die verschiedenen Farben wie die Töne durch verschiedene Grösse der Schwingungen sich unterscheiden, für die wahrscheinlichste unter allen von den früheren Autoren beschriebenen, weil er nicht einsehe, wie die Farben der dünnen durchsichtigen Platten oder Häutchen richtig erklärt werden könnten, ohne auf ätherische Wellen zurückzugehen. Doch halte er eine andere Hypothese für noch besser (und dies ist die oben angedeutete Vereinigung der Undulationstheorie mit der Emissionstheorie), derzufolge die Aetherwellen beim Auftreffen der materiellen vom leuchtenden Körper ausgesandten Theilchen erregt würden.<sup>2)</sup>

Gehen wir etwas näher auf diese in neuer Fassung vorliegende Aetherhypothese Newtons ein.

Newton setzt einen Aether voraus, der der Luft ähnlich ist, nur viel dünner und elastischer. Dieser Aether ist nicht homogen, sondern aus einem gröberen Stoffe und verschiedenen ätherischen Flüssigkeiten zusammengesetzt. Denn aus der Existenz der elektrischen und magnetischen Ausströmungen der Körper und aus der Existenz des schwermachenden Prinzips scheint eine solche Verschiedenheit zu folgen. Wie die atmosphärische Luft aus einem trägen Stoff von eigentlicher Luft, untermischt mit verschiedenen Dämpfen und Ausdünstungen besteht, so ist vielleicht das ganze Weltgebäude nichts als eine verschiedenartige Kondensation von gewissen ätherischen „Spirits“, die nach Art der Dämpfe, wenn auch nicht so leicht, kondensierbar sind, und auch wirklich kondensiert und nach der Kondensation in gewisse Formen gebracht sind, zuerst unmittelbar durch den Schöpfer, und seitdem durch die Naturkräfte. Mindestens scheinen die elektrischen Ausflüsse aus den Körpern zu lehren, dass alle Körper Stoffe von ätherischer Natur in sich kondensiert enthalten.

Alsdann beschreibt Newton ein Experiment. Er habe nämlich einen Metallrahmen mit einer Glasscheibe bedeckt und auf den Tisch gestellt. Wenn nun die Glasplatte gerieben wurde, so zog sie kleine Papierschnitzel an und stiess sie wieder ab. Zur Erklärung dieser Erscheinung sagt er: Woher alle diese unregelmässigen Bewegungen kommen sollen, kann ich mir nicht vorstellen, wenn nicht eine ätherische Materie in dem Glase kondensiert ist, die durch das Reiben verdampft und dann in dem abgeschlossenen Raume sich und damit das Papier vom Glase nach der Tafel zu und umgekehrt so lange bewegt, bis sie wieder in das Glas zurückkehrt und sich aufs neue kondensiert.

Nun geht Newton einen Schritt weiter und zieht aus dem angeführten Versuch einen Schluss auf die Ursache der Gravitation. Die Erde enthält grosse Mengen Aether und kondensiert denselben. Dann muss aber immerfort die äussere ätherische Flüssigkeit mit grosser Schnelligkeit zum Ersatz nach der Erde hinströmen, und diese Aetherströme werden die Körper über der Erde mit sich nach der Erde führen und zwar mit einer Kraft, welche den Oberflächen aller der Teile, auf welche die Ströme wirken, proportional ist.

Wie die Erde, so mag auch die Sonne diese Substanz einsaugen und dadurch sich nicht bloß ihre Leuchtkraft bewahren, sondern auch die Planeten verhindern, sich weiter von ihr zu entfernen.

Ausserdem nimmt Newton an, dass der Aether alle Körper durchdringe; dabei findet er aber doch einen gewissen Widerstand, und deshalb ist die Dichte des Aethers in den Körpern geringer als im Raum ausserhalb derselben; in verschiedenen Körpern

<sup>1)</sup> Diese Abhandlung war uns nicht zugänglich; wir zitieren daher nach Rosenberger, Newton.

<sup>2)</sup> A. a. O. S. 102, 103.



hat die Dichte des Aethers auch verschiedene Werte. Newton begnügte sich nicht damit, die Schwerewirkung durch den Aether zu erklären; er betrachtete auch die Kohäsion fester und flüssiger Körper, die Elastizität und selbst die Zusammenziehung der tierischen Muskeln als Wirkungen des Aethers.<sup>1)</sup>

Interessant ist auch die Rolle, die Newton dem Aether bei Erklärung einiger optischer Erscheinungen zuteilt.

Mit noch grösserer Deutlichkeit als früher (1672) erklärt Newton in der jetzt in Rede stehenden Abhandlung die Verschiedenheit der Farben durch verschieden grosse Aetherschwingungen. Entsprechend ihrer Grösse und Mischung werden diese Vibrationen die Empfindungen verschiedener Farben erregen, und die Harmonie der Farben mag auf der Harmonie dieser Schwingungen beruhen.<sup>2)</sup> Brechung und Reflexion des Lichtes werden durch verschiedene Dichte des Aethers bewirkt. Licht und Aether (die Lichtteilchen und der Aether) wirken nämlich so auf einander ein, dass ein Strahl, wenn er sich durch Aether von geringerer Dichte bewegt,<sup>3)</sup> kontinuierliche Stösse nach der Seite des dünneren Aethers empfängt und so nach dieser Seite hin abgelenkt wird. Weil der Aether an der Grenze zweier Flüssigkeiten weniger weich und nachgiebig ist als im Inneren, so wird dadurch die Zurückwerfung des Lichtes auch beim Auftreffen auf ein dünneres Medium bewirkt.

Die wichtige Frage endlich, warum beim Auftreffen des Lichtes auf eine spiegelnde Fläche stets ein Teil reflektiert, der andere eindringt und gebrochen wird (was später durch die Hypothese der „Anwandlungen“ erklärt wurde), beantwortet Newton in folgender Weise. Der Aether wird durch die auftreffenden Lichtstrahlen (Lichtteilchen) in den Körpern in Vibration versetzt, daher abwechselnd zusammengepresst und ausgedehnt. Diejenigen Lichtstrahlen nun, die auf den kondensierten Aether treffen, werden augenscheinlich zurückgeworfen, während diejenigen Strahlen, die auf den verdünnten Teil, auf das Intervall von zwei Vibrationen treffen, durchgelassen werden.

Damit fällt wesentlich die Erklärung der Farben dünner Blättchen zusammen. Newton sagt diesbezüglich: „Obgleich das Licht über alle Vorstellungen schnell ist, kann man doch annehmen, dass die Vibrationen, welche die Lichtstrahlen im Aether erregen, doch noch schneller fortschreiten als diese Strahlen. Diese Vibrationen, die, von der einen Oberfläche einer dünnen Platte zur anderen fortschreitend, die Strahlen überholen, mögen dann die Ursache sein, dass das Licht, wenn es auf die dichteren Stellen der Aetherschwingungen trifft, zurückgeworfen, sonst aber durchgelassen wird. Die Zurückwerfung oder Transmission des Lichtes hängt also von der Dicke der Platten ab. Hat man nicht Platten von Luft, sondern solche von Wasser oder Glas, so sind die Farbenringe enger, weil man annehmen kann, dass im dünneren Aether die Wellen kürzer sind als im dichteren.“<sup>4)</sup>

Das sind nun in der Tat Aeusserungen über den Aether und seine Verwendbarkeit zur Erklärung der Naturerscheinungen, wie wir sie vollständiger bisher kaum bei einem Vertreter der Undulationstheorie kennen gelernt haben. Wir dürfen aber nicht verschweigen, dass Newton vorsichtig die Erklärung beisetzte, er nehme keine von diesen Hypothesen an, weil er sie zur Erklärung der von ihm beschriebenen Erscheinungen nicht notwendig habe. Trotzdem glauben wir, dass er in der Aetherhypothese nur zu viele Anziehungspunkte und Hilfsmittel erblickte, um sich, ungeachtet der Abneigung vor Hypo-

<sup>1)</sup> Rosenberger, Newton, S. 104—106.

<sup>2)</sup> A. a. O., S. 108.

<sup>3)</sup> Der Aether ist in allen Körpern geringer als in der Luft, wie oben bemerkt worden.

<sup>4)</sup> Rosenberger, Newton, S. 107—109. Den Isochronismus der Wellen vorausgesetzt, hätte dieser Gedanke zum richtigen Ergebnis geführt, dass das Licht sich im dichteren Medium, welches aber aetherisch dünner ist, langsamer fortpflanzt, während die Emissionstheorie die gegenteilige Annahme machte.



thesen, ganz davon losreissen zu können. Seltsam ist immerhin diese Verquickung der Emissionstheorie mit der Undulationstheorie. Offenbar sollte durch die Annahme der materiellen Lichtteilchen der Schwierigkeit ausgewichen werden, die Newton in der Undulationstheorie für die geradlinige Fortpflanzung des Lichtes erblickte.<sup>1)</sup>

Aber für die Erklärung der Farben, der Reflexion, Brechung und ähnlicher Erscheinungen sah Newton die Brauchbarkeit der Aetherschwingungen wohl ein.

Lloyd bemerkt zu dieser eigentümlichen Verbindung, welche Newton zwischen den beiden Lichttheorien herstellte: „Hätte Newton ganz einfach den molekularen Teil seiner Hypothese fortgelassen und angenommen, die Schwingungen seines ätherischen Mediums würden direkt durch die des leuchtenden Körpers erregt, so würde sich seine Theorie von selbst in die Huygens'sche und Hooke'sche aufgelöst haben. Man muss hierbei bemerken, dass Newton wirklich für die strahlende Wärme die Wellentheorie angenommen hat, und dass er nicht glaubte, die Wärme würde durch Uebertragung materieller Teilchen, sondern durch die Schwingungen eines ätherischen Mediums fortgepflanzt.“<sup>2)</sup>

Die Zumutung, die Lloyd hiemit Newton macht, dürfte wohl etwas stark sein. Im molekularen Teil seiner Hypothese war die so ausserordentlich schnelle, geradlinige Fortpflanzung der Lichtteilchen schwer zu begreifen, enthielt aber keinen Widerspruch in sich; dagegen war die oben erwähnte Schwierigkeit in der Undulationstheorie für Newton geradezu unüberwindlich. Darum können wir es wohl begreifen, wenn dieser etwas annahm, das für ihn zwar möglich, aber immerhin schwer zu erklären war, wenn er dagegen das zurückwies, von dessen Unmöglichkeit er überzeugt war.

Das bisher Angeführte ist in der Abhandlung vom Jahre 1675 enthalten. Newtons Beschäftigung mit der Aetherhypothese lässt sich jedoch noch weiter verfolgen. In einem Briefe an Boyle<sup>3)</sup> vom Jahre 1679 legt er noch einmal weitläufig seine Ansicht über den Aether dar und erklärt durch ihn die Brechung des Lichtes, das Zusammenhalten zweier fein polierter Metallstücke unter dem Rezipienten einer Luftpumpe, die Adhäsion des Quecksilbers an Glasröhren, die Kohäsion der Teile aller Körper, die kapillare Anziehung, die Schwere und ähnliche Erscheinungen. Brewster, der Biograph Newtons, macht alsdann die für uns wichtige Bemerkung: „Diesen Meinungen über die Existenz des Aethers hat Newton, wie es scheint, in der Folge entsagt, denn in der Handschrift, die im Besitze des Dr. Gregory ist, die vor 1702 geschrieben wurde, gibt er an, dass der Aether weder unseren Sinnen kenntlich ist, noch durch Argumente unterstützt wird, sondern ein willkürliches Postulat ist, welches, wenn wir der Vernunft und unseren Sinnen trauen wollen, aus der Natur der Dinge verbannt werden muss, und er fährt fort, die Gültigkeit dieser Meinung durch allerlei Argumente darzutun.“<sup>4)</sup> Auch im Jahre 1686 soll Newton in einem Schreiben an Halley auf die Ansicht von 1675 zurückgekommen sein mit der Bemerkung, dass man das dort Gesagte nur für eine Mutmassung, die er nicht für unbezweifelt

<sup>1)</sup> Dass Newton in der Bewegung der Lichtteilchen diese Schwierigkeit nicht erblickte, beweist folgende Stelle, die freilich einer späteren Zeit entstammt: „Annon radii luminis exigua sunt corpuscula e corporibus lucentibus emissa? Etenim istiusmodi corpuscula per media uniformia transmitti debebunt in lineis rectis, sine inflectendo in umbram; quo quidem modo transmittuntur radii luminis.“ *Optice*, p. 298, 299.

<sup>2)</sup> Lloyd, Abriss einer Geschichte der gegenwärtigen physischen Optik, S. 8.

<sup>3)</sup> Brewster, Newtons Leben, S. 255. — In den Schriften des hier genannten R. Boyle (1627—1691) finden sich einige Aeusserungen über den Aether. So sagt er einmal: Ob übrigens eine solche Materie in der Welt existiere oder nicht, kann ich nicht genau erkennen, obgleich verschiedene Versuche zu beweisen scheinen, dass in der Welt eine ätherartige, überaus feine, sehr verbreitete Materie existiert. *De systematicis vel cosmicis rerum qualitibus*. Cap. IV. p. 5. — Betreffs der Natur des Lichtes scheint er zwischen der Korpuskulartheorie und der Anschauung Descartes' geschwankt zu haben. *Ibid.* p. 8. Cf. *Experimenta et considerationes de coloribus*, p. 34, 35.

<sup>4)</sup> Brewster, a. a. O. S. 256.



halte, ansehen müsse. In demselben Schreiben soll er auch die Hypothese des dünneren und dichteren Aethers vollständig aufgegeben haben.<sup>1)</sup> Aus solchen Aeusserungen darf man schliessen, dass Newton nicht mehr zu seinen früheren Ansichten stehen wollte; in jenen Jahren muss ein Umschlag in seinen Anschauungen eingetreten sein. Diese Wendung der Anschauungen, welche der ganzen physikalischen Gedankenwelt des grossen Physikers eine andere Richtung gab, setzt Rosenberger in die Zeit zwischen den optischen Auseinandersetzungen von 1675 und 1679 und dem Hauptwerke („Prinzipien“) von 1687. Sie mag der Ausarbeitung der letzten Aetherhypothese sehr bald, wahrscheinlich am Anfang der achtziger Jahre, vielleicht noch im Jahre 1679 (in welches Jahr der Anfang der eigentlichen Bearbeitung der Prinzipien zu setzen ist) gefolgt sein; dass sie aber wirklich um diese Zeit stattgefunden habe, daran kann nicht gezweifelt werden.<sup>2)</sup> Demnach musste Newton offenbar durch die Bearbeitung der Prinzipien und durch das Studium der dort behandelten Fragen zu seiner Gesinnungsänderung gebracht worden sein.

Das Hauptwerk Newtons erschien im Jahre 1687 unter dem Titel *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Der gewählte Name bezeichnet bereits das ganze Verhalten Newtons. Es sollten mathematische Prinzipien sein, und in der Tat beruft sich Newton bei jeder Gelegenheit darauf, dass er nicht die physikalischen Ursachen der Erscheinungen erforsche, sondern nur die mathematischen Gesetze gebe, denen sie gehorchen. Durch seine Resultate möchten dann die Physiker angeregt werden, ihrerseits die physikalischen Ursachen aufzudecken.

Je weiter sodann die Theorie der Gravitation in Newtons Ideenkreis gedieh, je allgemeiner sich ihre Gesetze gestalteten, desto mehr erwachte in ihm die Neigung, die anziehenden Kräfte getrennt von ihrer physikalischen Ursache aufzufassen. Damit verband sich eine Art Abneigung gegen alle Versuche, die Ursache der Gravitation in einem vermittelnden Agens, dem Aether, zu suchen; ja der Aether verschwand überhaupt aus den Prinzipien und dem grossen optischen Hauptwerke vom Jahre 1704. „Die Hauptursache, warum Newton die Undulationstheorie nicht für sich annehmen, und noch weniger seiner Schule empfehlen konnte, lag weniger auf optischem Gebiete, als vielmehr in dem Zusammenhang der Naturerscheinungen überhaupt und vor allem in der angenommenen Unmöglichkeit, die Existenz eines alle Welträume erfüllenden Aethers mit seiner theoretischen Mechanik der Himmelsbewegungen zu vereinigen. Und selbst wenn Newton als Optiker der Undulationstheorie günstiger gesinnt gewesen wäre, als er es in Wirklichkeit wohl war, so hätte er in Rücksicht auf seine mechanische Physik dieselbe doch mit der Existenz des Aethers verwerfen müssen.“<sup>3)</sup>

Betreffs der Bewegung der Himmelskörper schlug Newton folgenden Gedanken- gang ein. Bei seinen Untersuchungen über die Bewegung fester Körper in Flüssigkeiten fand er, dass ein Körper sich darin nicht bewegen könne, ohne einen Widerstand zu erfahren, welcher, als entgegengesetzt gerichtete Kraft aufgefasst, eine Verzögerung der Bewegung bewirken müsse. Nun hängt dieser Widerstand, ganz abgesehen von der Masse und der Geschwindigkeit des sich bewegenden Körpers, ab von der Dichte des Mediums und der Kohärenz seiner Teilchen. Luft, Wasser und Quecksilber würden, selbst ins Unendliche verdünnt, geworfenen Körpern widerstehen. Zwar könnte der Widerstand aus der Zähigkeit und Reibung der Teilchen vermindert werden, aber jener Widerstand, der aus der Trägheit der Materie entsteht, kann nicht beseitigt werden. Daraus zieht Newton den für die Aetherhypothese verhängnisvollen Schluss: die Himmelsräume, in denen sich die Kugeln der Planeten und Kometen unaufhörlich, in jedem Sinne frei

<sup>1)</sup> A. a. O. S. 255; Humboldt, Kosmos, Bd. III, S. 33.

<sup>2)</sup> Rosenberger, Newton, S. 127, 129.

<sup>3)</sup> Rosenberger, A. a. O. S. 333.



und ohne merkbare Verminderung ihrer Geschwindigkeit bewegen, müssen von jeder körperlichen Flüssigkeit frei sein, vielleicht einige sehr leichte Dünste und die durch sie gehenden Lichtstrahlen ausgenommen.<sup>1)</sup>

Damit war offenbar der Aether aus dem Himmelsraum verbannt. An der bis 1679 von ihm vertretenen Lichttheorie hätte dies noch nichts geändert, da nach derselben nicht die Aetherwellen, sondern die materiellen Lichtteilchen sich durch den Himmelsraum bewegen.

Weil aber der Aether, als raumerfüllendes Medium, wenn er überhaupt existieren soll, überall verbreitet sein muss, so hätte es wenig Sinn gehabt, nur einen intrakorporellen Aether anzunehmen; daher führte die Entfernung des Aethers aus den Himmelsräumen konsequent zum Aufgeben der Aetherhypothese überhaupt.<sup>2)</sup>

Die Tatsache, dass Newton den materiellen Lichtteilchen einen Platz im Himmelsraum gewährte, forderte Eulers scharfe Kritik heraus. Newton habe wahrlich nicht viel erreicht, sagt jener, wenn er, um die freie Bewegung der Himmelskörper zu erklären, den Aether entfernt und dafür den Himmelsraum mit der Lichtmaterie angefüllt.<sup>3)</sup> Die zahllos ausgesandten Lichtteilchen müssten ja, wie Euler hervorhebt, einander treffen, sie müssten sich gegenseitig stören und den Bewegungen der Himmelskörper einen Widerstand entgegensetzen. Diese Einwürfe verlieren übrigens viel von ihrer Beweiskraft, wenn man bedenkt, dass um einen kontinuierlichen Lichteindruck auf das Auge hervorzubringen, es genügt, wenn jede Zehntelsekunde ein Lichtteilchen ins Auge gelangt. Da nun das Licht in einer Sekunde  $3 \cdot 10^5$  Kilometer zurücklegt, so können die einzelnen Lichtteilchen in Zwischenräumen von  $3 \cdot 10^4$  Kilometer auf einander folgen.<sup>4)</sup>

Trotzdem bleiben die Einwürfe Eulers wenigstens prinzipiell doch in Kraft; denn man wird nicht läugnen können, dass im Laufe der Zeit, wenn nicht eine Verdichtung oder Verwandlung der Lichtmaterie eintreten soll, sie selbst ein eben so widerstrebendes Mittel bilden würde wie der Aether.

Was die Nichtexistenz des Aethers betrifft, lautet der Schluss, den Newton zieht, offenbar folgendermassen: Nach meiner Theorie müssen die Himmelskörper, wenn sie sich in einer materiellen Flüssigkeit (wozu offenbar auch der Aether gehört) bewegen, einen Widerstand, eine Veränderung ihrer Geschwindigkeit erfahren; nun ist ein solcher Widerstand nicht beobachtet worden; also existiert ein widerstrebendes Medium nicht. Dagegen ist folgendes zu bemerken: Ein den Himmelsraum erfüllender Aether wird auch bei höchster Verdünnung die Bewegung der Himmelskörper beeinflussen, vorausgesetzt, dass der Aether nicht selbst Ursache der Gravitation ist; wäre aber der Aether selbst Ursache der Gravitation, so wäre nach Secchi eine beliebig grosse Dichte desselben belanglos. Kann man nun daraus, dass eine Störung nicht beobachtet worden, schliessen, es sei ein solches Hindernis gar nicht vorhanden? Wir glauben kaum. Die Nichtbeobachtung einer Störung gestattet nur den Schluss, dass entweder ein störendes Medium nicht vorhanden, oder dass die Störungen so gering sind, dass sie sich in der Beobachtungszeit, welche Newton als beweisend für sich in Anspruch nehmen konnte, nicht wahrnehmbar machten. Die Möglichkeit des letzteren gibt Newton selbst zu, wenn er sagt, dass sich eine Störung der Planeten erst im Verlaufe von Jahrtausenden bemerkbar

<sup>1)</sup> Principia math. II, p. 255.

<sup>2)</sup> Newton ist übrigens auch in diesem Punkte nicht sehr klar und bestimmt mit seiner Meinung herangerückt. Deshalb durfte Fischer sagen: „Keine einzige Stelle findet sich in seinen Schriften, wo eine absolute Leere im Weltraum behauptet würde, vielmehr redet er an mehreren Stellen von einem sehr feinen Mittel (Aether), welches selbst der luftleere Raum enthalte.“ Geschichte der Physik, Bd. IV, S. 273. — Wir geben dies zu, zumal ja Newton über den Aether sehr viel geschrieben hat. Es fragt sich nur, ob er in dieser Periode der wissenschaftlichen Tätigkeit, die wir jetzt besprechen, den Aether aufgegeben habe; und das scheint der Fall zu sein.

<sup>3)</sup> 18. Brief.

<sup>4)</sup> Brandes in Gehlers Phys. Lex. Bd. VI, S. 310.



machen könne, dass in der Himmelsgegend, wo das Gewicht des Mittels, in dem sich die Planeten bewegen, ins Unendliche abnimmt, der Widerstand fast gleich Null sein müsste. Und da sich nach seiner Ansicht in einer Höhe von 200 Meilen die Dichtigkeit der dortigen Luft zur Dichtigkeit der uns umgebenden verhalte wie 1 : 75 Billionen, so würde in einem solchen Mittel der Jupiter in einer Million Jahren nicht ein Milliontel seiner Bewegung verlieren.<sup>1)</sup> Ebenso machte Newton später in der 22. Frage seiner Optik die Bemerkung, dass, wenn der Aether  $7.10^5$  mal elastischer und ebensoviel mal dünner wäre als die atmosphärische Luft, der Widerstand dieses Mediums so gering wäre, dass eine Störung der Planetenbewegung in zehntausend Jahren nicht wahrgenommen werden könnte. Hätte er also für den Aether solche Dichte- und Elastizitätsverhältnisse angenommen, so hätte er die freie Bewegung der Himmelskörper, soweit sie damals konstatiert war, leicht mit der Existenz des Aethers im Weltraume vereinigen können.<sup>2)</sup>

Wir führen an dieser Stelle noch einige spätere Resultate über den Einfluss des Aethers auf die Planetenbewegung an.

Als man a priori den Aether als ein sehr feines Fluidum annahm, dachte man, dass er nicht imstande sei, den Lauf der Planeten in merkbarer Weise zu beeinflussen, und hielt diesen Umstand für einen negativen Beweis der Existenz des Aethers. Später ging man genau den umgekehrten Weg. Es wurden gewisse Störungen im Laufe von Himmelskörpern, namentlich von Kometen festgestellt. Um sie zu erklären, führte man in die Rechnung den Widerstand eines ätherischen Mittels ein und fand jetzt die Rechnung übereinstimmend mit der wirklichen Bewegung des Kometen; und jetzt schloss man aus der beobachteten Störung einerseits und den zutreffenden Resultaten mit Einführung einer Störung durch den Aether anderseits auf die Existenz des Aethers.<sup>3)</sup>

Zur Theorie eines widerstrebenden Mittels hat der im Jahre 1818 entdeckte und nach Enke benannte Komet Veranlassung gegeben. Enke berechnete seine Bahn und sagte sein Wiedererscheinen voraus. Nun ergab sich aber, dass der Komet das Perihelium stets  $2\frac{1}{2}$  Stunden früher passierte, als die Rechnung es forderte. Zur Erklärung dieser Störung nahm Enke ein den planetarischen Raum erfüllendes Medium (Aether) an, welches zwar von sehr geringer Dichte sei und deswegen auf die übrigen Gestirne keinen merkbaren Einfluss ausübe, aber dennoch für den selbst dünnen Kometen Ursache der Störung sein könne und zwar in der Weise, dass in Folge des Widerstandes, welchen der Aether dem Kometen entgegensetzt, die Anziehungskraft der Sonne grösser und der Komet sich daher der Sonne nähern wird; dadurch wird die grosse Achse kleiner und deshalb nach dem dritten Kepler'schen Gesetz die Umlaufszeit verkleinert, wodurch das verfrühte Erscheinen des Kometen erklärt ist.<sup>4)</sup>

Da theoretisch ein wenn auch sehr geringer Widerstand unaufhörlich wirkend im Laufe der Jahrtausende doch eine merkbare Aenderung hervorbringen muss, so dürfte es

<sup>1)</sup> Princ. math. III, p. 42, 43.

<sup>2)</sup> Newton steht mit solchen Zahlen nicht allein da. Euler stellte eine Formel für die Dichtigkeit und Elastizität des Aethers auf. Ist der Aether  $n$  mal elastischer und  $m$  mal dünner als die Luft, so ist nach ihm

$$nm = 387467100000.$$

Ist  $n = 1000$ , so  $m = 387467100$  und dann erleidet auch die Planetenbewegung keine Störung. Dies die Annahme Eulers. Setzt man in obiger Formel  $n = 700000$ , so wird  $m$  von derselben Grössenordnung wie Newton angenommen hat.

Auf die Angaben von Newton und Euler bezieht sich nach Miething (dem wir auch obige Formel entnommen haben) eine Stelle aus einem Briefe Daniel Bernoullis an Euler vom 25. Dezember 1743, wo es heisst, dass „die *velocitas luminis*, die *densitas ætheris*, und dessen *elasticitas* in *diversis distantiiis a sole* sehr differieren können, so als wie die *velocitas soni*, *densitas* et *elasticitas æris* in *diversis altitudinibus a superficie terræ* mächtig differieren. Also ist die *velocitas luminis* noch sehr unbekannt. Nebstdem setzen Sie die *elasticitatem ætheris* nur hundert mal (soll wohl heissen tausend mal) grösser als die *elasticitatem æris*, da sie vielleicht bei Millionen mal grösser ist, welches auch Newton statuiert, woraus die *densitas ætheris* viel grösser würde und consequenter eine weit grössere *resistentiam* exercieren.“ Miething, a. a. O., S. 7, 8.

<sup>3)</sup> Gehlers Phys. Wörterb. Bd. I, S. 271.

<sup>4)</sup> Marbach, Phys. Lexicon. 1850. Artikel Kometen.



von Interesse sein, hier anzuführen, welche Bewegungselemente beeinflusst werden und in welcher Weise dies geschieht.

Brandes fasst im Phys. Wörterbuch die diesbezüglichen Resultate in folgender Weise zusammen:

1. Durch keinen noch so grossen Widerstand wird die Lage der Apsidenlinien der Planetenbahnen geändert. 2. Vermöge des Widerstandes im Aether muss die mittlere Entfernung des Planeten stetig abnehmen. 3. Mit einer solchen Abnahme der Entfernung ist eine Beschleunigung der mittleren Bewegung verbunden, welche bei den unteren Planeten mehr als bei den oberen betragen muss, und die Korrektion der mittleren Länge ist dem Quadrat der Zeit proportional. 4. Der Widerstand bewirkt eine Verminderung der Excentrizität, und diese Verminderung ist der Grösse der Excentrizität selbst proportional. Da aber diese Aenderungen offenbar um so geringer sind, je grösser die Masse des bewegten Körpers ist, und die Dichtigkeit der Planeten der Dichte des Aethers gegenüber als sehr bedeutend angesehen werden muss, so ist in Wirklichkeit doch eine Aenderung noch nicht wahrgenommen worden, und es kann aus der Bewegung der Planeten weder auf einen solchen Widerstand, noch auf die Anwesenheit eines hindernden Mittels geschlossen werden. Die Kometen sind aber von viel geringerer Dichte als die Planeten, und wenn ein widerstrebendes Mittel vorhanden ist, so muss es auf ihre Bewegung merkbar einwirken, was in der Tat, wie bereits angeführt worden ist, beobachtet wurde.<sup>1)</sup>

Kehren wir wieder zu Newton zurück. Wenn er sich die Himmelsräume ohne vermittelndes Medium dachte, so musste er für die Gravitation eine unmittelbare Wirkung in die Ferne zulassen, und weil nunmehr eine mechanische Ursache nicht mehr angenommen werden konnte, musste das gegenseitige Bestreben der Körper, sich zu nähern, in sie selbst verlegt, es musste ihnen als angeschaffene Eigenschaft beigelegt werden. Newton mochte diese Konsequenz fühlen, und wir verstehen es, wenn er stets betont, er gebe nur die mathematischen Gesetze der Gravitation, ohne auf die physische Ursache einzugehen. Dagegen wäre an sich nichts einzuwenden; denn es wird einem Mathematiker stets gestattet sein, eine tatsächlich existierende Erscheinung seinen Berechnungen zu Grunde zu legen, ohne sich über die Ursache der Erscheinung Rechenschaft geben zu müssen.

Bei Newton liegen die Verhältnisse insofern etwas anders, als er sich zuweilen doch über die Natur der Schwere mehr oder weniger bestimmt äusserte. So hatte er in der ersten Auflage der Prinzipien den Körpern die Schwere als allgemeine Eigenschaft beigelegt; in der dritten Auflage (1725) sagt er (Rosenberger meint durch die auftauchenden Widersprüche zur Aenderung veranlasst): „Indessen behaupte ich keineswegs, dass die Schwere den Körpern wesentlich sei.“<sup>2)</sup>

Interessante Aeusserungen enthalten diesbezüglich seine Briefe an Bentley.<sup>3)</sup> Den zweiten Brief schliesst er mit den Worten: Bentley spreche einige mal von der Schwere so, als ob dieselbe der Materie wesentlich und inhärent sei. Diese Ansicht möge er ja nicht als seine (Newtons) Meinung ausgeben; denn er prätendiere nicht, zu wissen, was die Ursache der Schwere sei.

<sup>1)</sup> Gehlers Phys. Wörterb. Bd. I, S. 272—274. — Andere, z. B. Schröder A. (in seiner Programmarbeit: Untersuchungen über den Lichtäther, Einleitung) und Secchi (Einheit der Naturkräfte Bd. I, S. 248, 249) sehen die Ursache der Beschleunigung des Enke'schen Kometen nicht im Aether. Betreffs der um die Mitte des 18. Jahrhunderts über diesen Gegenstand erschienenen Schriften verweisen wir auf Fischer, A. a. O., Bd. IV, S. 274—278.

<sup>2)</sup> Attamen gravitatem corporibus essentialem minime affirmo. Princ. math. III, p. 4. — In der Vorrede zur Optik (1717) sagt er: Et ne quis gravitatem inter essentialia corporum proprietates me habere existimet, quaestionem de ejus causa investiganda subjei.

<sup>3)</sup> Robert Boyle hatte in seinem Testamente jährlich acht Vorlesungen zur Verteidigung der Wahrheit des Christentums gestiftet. Die ersten Vorlesungen hielt im Jahre 1692 Richard Bentley. Unter anderem wollte er die Nichtigkeit des Atheismus dartun aus dem Ursprung und der Einrichtung des Weltgebäudes. Dafür studierte er auch Newtons Prinzipien und wandte sich persönlich an ihn, um zu erfahren, ob er ihn richtig aufgefasst habe. Daher die erwähnte Korrespondenz. Rosenberger, Newton, S. 264. ff.



Ausführlicher noch spricht Newton im 4. Briefe. Wir führen die wichtige Stelle nach Rosenberger an: „Die erste ihrer vier Propositionen erscheint mir sehr evident, vorausgesetzt, dass Sie den Begriff der Attraktion in einem so allgemeinen Sinn nehmen, dass darunter jede Kraft verstanden wird, durch welche räumlich getrennte Körper bestrebt sind, sich einander zu nähern, ohne dass ein mechanischer Impuls sie dazu antreibt. — Es ist in Wahrheit unbegreiflich, wie unbeseelte, unvernünftige Materie, ohne Vermittlung von irgend etwas anderem, welches nicht materiell ist, auf andere Materie einwirken und dieselbe ohne gegenseitige Berührung affizieren könnte, wie es geschehen müsste, wenn die Gravitation in dem Sinne von Epicur der Materie wesentlich und inhärent sein sollte. Und dies ist der Grund, warum ich nicht möchte, dass Sie mir den Begriff einer eingeborenen Gravitation zuschreiben. Dass die Gravitation der Materie wesentlich, inhärent und anerschaffen sein sollte, sodass ein Körper auf einen anderen wirken könnte auf die Entfernung hin, durch den leeren Raum, ohne durch die Vermittlung von irgend etwas, durch welches ihre Aktion und Kraft vom einen zum anderen geleitet werden könnte, das ist nach meinem Dafürhalten eine so grosse Absurdität, dass ich glaube, kein Mensch, welcher in philosophischen Dingen eine genügende Denkfähigkeit hat, könne jemals darauf verfallen. Die Gravitation muss durch ein Agens, welches konstant nach gewissen Gesetzen wirkt, verursacht sein; ob aber dieses Agens materiell oder immateriell ist, habe ich der Ueberlegung meiner Leser überlassen.“<sup>1)</sup>

Aber schon Bentley lehrte, dass die Schwere eine von Gott der Materie angeschaffene Eigenschaft sei, und auch die Schule Newtons hielt diese Ansicht gegen alle mechanischen Erklärungsversuche hoch, indem sie gern auf die Allmacht Gottes hinwies, der wohl eine solche Eigenschaft der Materie einpflanzen konnte.

Aus dem Gesagten geht also deutlich hervor, dass Newton in dieser Periode seiner wissenschaftlichen Tätigkeit mit der Aetherhypothese vollständig gebrochen hatte. Diese Aenderung in seinen Anschauungen machte sich auch in dem optischen Hauptwerk, welches zum ersten mal im Jahre 1704 erschien, geltend. Die veränderte Lichtlehre tritt uns ferner in den Prinzipien entgegen, wo ohne Erwähnung des Aethers die Erscheinungen der Reflexion, Brechung und Beugung des Lichtes nur durch anziehende und abstossende Kräfte, die in der ponderablen Materie ihren Sitz haben, erklärt werden. Demnach erfährt ein Lichtstrahl an der Grenze eines brechenden Mediums nicht eine Diskontinuität, sondern die Brechung findet allmählich statt. Der Weg des Lichtstrahles ist eine Parabel, deren Aeste zu verschiedenen Seiten des brechenden Mediums liegen. Der einfallende und gebrochene Strahl sind Tangenten an dieser Parabel. Bei der Reflexion dringt der Strahl etwas in den Körper ein, wird dann aber zurückgebogen, sodass diese Parabel ihren Scheitel im reflektierenden Körper, ihre beiden Aeste aber in der Einfallsebene hat.<sup>2)</sup>

Wiewohl es erst im Anhange zur Optik ist, wo Newton ausdrücklich die Materialität des Lichtes betont, wird diese Supposition doch von ihm schon früher gemacht; sie geht mit dem Aufgeben der Aetherhypothese Hand in Hand. Wenig befriedigt dasjenige, was er in der Optik über die Natur der Farben bemerkt. Die Farbe ist in den Körpern nichts anderes als eine gewisse Disposition, durch die sie diese oder jene Farben (wohl Arten von Lichtstrahlen) kräftiger zurückwerfen; in den Lichtstrahlen ist die Farbe ebenfalls nur eine gewisse Disposition, diese oder jene Bewegung auf den Gesichtssinn zu übertragen, und diese bestimmte Bewegung erregt im Sensorium den Eindruck einer bestimmten Farbe.<sup>3)</sup> Diese Darlegung wird nur dann verständlich, wenn wir eine Stelle

<sup>1)</sup> A. a. O., S. 267, 268.

<sup>2)</sup> Princ. math. I, p. 412 seq.

<sup>3)</sup> Optice, p. 89. 90.



aus dem Anhang zur Optik beziehen. Newton sagt nämlich dort nach einer abermaligen Zurückweisung des Aethers und der Undulationstheorie: „Um alle die verschiedenen Farben und ihre verschiedene Brechbarkeit zu erzeugen, ist nur notwendig, dass die Lichtstrahlen Körperchen von verschiedener Grösse sind. Die kleinsten Körperchen verursachen die violette Farbe und werden auch am leichtesten von ihrer Richtung abgelenkt; Violett ist die am meisten brechbare Farbe. Die rote Farbe wird durch die grössten Lichtkörperchen erzeugt, und da diese Teilchen am wenigsten von ihrer Richtung abgelenkt werden, so ist Rot die am wenigsten brechbare Farbe. Die dazwischen liegenden Farben entstehen durch Körperchen entsprechender Grösse und zeigen eine ihrer Grösse entsprechende Brechbarkeit.<sup>1)</sup>

Um von dieser Erklärung der Farben auf die früher gegebene zurückzukommen, müsste man nur die Wörter Welle und Körperchen mit einander vertauschen; aber in diesen beiden Wörtern liegt eben der Grundcharakter der beiden Lichttheorien. Newton hat sich durch die seinem Weltsystem zu lieb geschehene Annahme der Emissionstheorie wenigstens objektiv von der Wahrheit entfernt, obgleich ihm jetzt die Emissionstheorie wohl wahrscheinlicher vorkam.

Um diese Periode seiner Tätigkeit hinreichend zu kennzeichnen, fügen wir noch Einiges über die berühmten sogenannten Anwandlungen des Lichtes bei.

Newton war einer Untersuchung, wie diese Anwandlungen zustande kommen, grundsätzlich abgeneigt. Um aber jene zu befriedigen, die für jede neue Erscheinung eine Hypothese zur Erklärung haben wollen, bemerkt er Folgendes.

In gleicher Weise, wie Steine, ins Wasser geworfen, eine Wellenbewegung und Körper in der Luft Schwingungen erzeugen, erzeugen auch die Lichtstrahlen bei ihrem Auftreffen auf eine brechende oder reflektierende Oberfläche in der Substanz Vibrationen, die sich den festen Körperteilchen mitteilen. Dadurch wird der Körper gleichsam erwärmt; und die Vibrationen verbreiten sich im brechenden oder reflektierenden Medium auf dieselbe Weise, wie die Schallwellen in der Luft sich fortpflanzen. Nun bewegen sich aber diese Schwingungen im Körper schneller vorwärts als das Licht. Je nachdem nun ein Lichtstrahl mit einer gleich- oder entgegengesetzt gerichteten Schwingung eines Körperteilchens zusammentrifft, wird der Strahl leichter durchgelassen oder leichter reflektiert.<sup>2)</sup>

Nach dem bisher Gesagten würde für die leichtere Reflexion oder Transmission nur die Bewegung der Teilchen des brechenden oder reflektierenden Körpers bestimmend sein. Newton schreibt aber dem Strahle selbst, sobald er den leuchtenden Körper verlässt, eine gewisse bleibende Disposition für leichtere Reflexion oder Transmission zu, ohne eine nähere Auseinandersetzung zu geben.<sup>3)</sup> Ausserdem kehren nach seiner Ansicht die Anwandlungen nach bestimmten Intervallen wieder; diese Intervalle sind für Rot am grössten, für Violett am kleinsten.<sup>4)</sup>

Die neue (Emissions-) Theorie Newtons hat gegenüber der früher von ihm vertretenen an Anschaulichkeit sicherlich nicht gewonnen, an Wahrscheinlichkeit aber viel verloren. Secchi gibt über sie folgendes treffliche Urteil ab: „Newton's Optik ist entschieden ein unvergängliches Denkmal seines Geistes, zugleich ist es aber auch ein Werkzeug, das nur in den Händen seines Erfinders nutzbar war; es ist der Bogen des Ulysses, den er

<sup>1)</sup> L. c. p. 300.

<sup>2)</sup> Man könnte sich diesen Vorgang durch folgenden Vergleich anschaulich machen. Setzen wir voraus, es wolle jemand in bestimmter Richtung durch eine Türöffnung gehen, in welcher eine Schaukel schwingt. Ein Durchgang ist nur möglich, wenn sich die Person und die Schaukel im gleichen Sinn bewegen; anderenfalls würde die Person von der Schaukel zurückgeworfen werden.

<sup>3)</sup> L. c. p. 219.

<sup>4)</sup> Vgl. Rosenberger, Geschichte der Phys. Bd. II, S. 195.



nur selbst in jedem einzelnen Falle durch eine Hypothese, welche speziell für jeden Versuch erfunden werden musste, zu spannen vermochte.<sup>1)</sup>

Damit verlassen wir diese zweite Periode in Newtons Tätigkeit auf unserem Gebiete. Sie ist für die Entwicklung der Aetherhypothese nicht ohne Bedeutung; denn gerade da zeigt sich die Brauchbarkeit dieser Hypothese, wenn wir sehen, welche Schwierigkeiten sich ohne dieselbe vor dem grossen Naturforscher und Philosophen aufgetürmt haben. Newton musste dies schliesslich selbst eingesehen haben; denn in der zweiten Auflage seiner Optik hat er eine Reihe von neuen Fragen beigelegt, in welchen er sich wiederum weitläufig über Existenz, Eigenschaften und Wirkungen des Aethers verbreitet. Diese Fragen enthalten nach seiner eigenen Erklärung jenes Material, welches er nicht hinreichend prüfen konnte, um es in fester Form, wie es seine Gewohnheit war, zu veröffentlichen.<sup>2)</sup>

Diese Fragen besitzen unter allen Schriften Newtons einen ganz eigentümlichen Charakter, den Rosenberger gut kennzeichnet, wenn er von ihnen sagt: „Sie sind das einzige Gebiet, auf dem Newton sich erlaubt hat, seine Gedanken über die innere Natur der Erscheinungen unverhüllt sichtbar werden zu lassen, auf dem er die Berührung mit Hypothesen nicht gescheut, sondern geradezu gesucht hat. Sie lassen am meisten von allen Veröffentlichungen Newtons einen Blick in seine Gedankenwerkstatt werfen und sind darum für das Verständnis der Newton'schen Physik von ganz besonderer Wichtigkeit.“<sup>3)</sup>

Obgleich die in den genannten Fragen ausgesprochenen Gedanken mit den früher angeführten wesentlich übereinstimmen, teilen wir sie hier doch mit. Die erste Stelle, die sich auf den Aether bezieht, findet sich in der 18. Frage.<sup>4)</sup> Da heisst es: „Wird nicht die Wärme eines erhitzten Raumes in dem Vacuum durch Schwingungen eines Mittels fortgepflanzt, welches weit feiner ist als die Luft und welches im Vacuum bleibt, auch wenn man die Luft daraus entfernt hat? Und ist dieses Mittel nicht dasselbe, wie dasjenige, durch welches das Licht gebrochen und reflektiert wird? Ist dieses Mittel, durch dessen Schwingungen das Licht den Körpern Wärme mitteilt und in die Anwandlungen leichter Zurückwerfung und leichter Durchdringung versetzt wird, nicht weit feiner als die Luft? Und ist dieses Mittel nicht unendlich viel seltener und feiner verteilt wie Luft und unendlich elastischer und aktiver als diese? Erfüllt es nicht alle Körper und verbreitet es sich nicht durch seine elastische Kraft im ganzen Weltraum? Entsteht nicht die Brechung des Lichtes infolge der an verschiedenen Orten auch verschiedenen Dichte dieses ätherischen Mittels, indem das Licht stets nach den dünneren Gegenden des Aethers ausweicht? Und ist nicht die Dichte dieses Mittels in freien und offenen Räumen, die von Luft und anderen Körpern frei sind, grösser als in den Poren des Wassers, des Glases, des Krystalls, der Edelsteine und der dichteren Körper überhaupt? Wird nicht dieses ätherische Mittel beim Uebergang aus dichteren Körpern in leere Räume allmählich dichter, und bricht es deswegen nicht die Lichtstrahlen, nicht plötzlich, sondern allmählich zu einer krummen Linie? Und ist nicht gerade diese vom Körper aus zunehmende Dichte des

<sup>1)</sup> Secchi, Einheit der Naturkräfte, I, S. 228, 229.

<sup>2)</sup> Vorwort zur Optik.

<sup>3)</sup> Rosenberger, Newton, S. 302.

<sup>4)</sup> Nach Fischer (Gesch. d. Phys. Bd. III, S. 214, 215) hatte diese Quaest. XVIII ihre Vorgeschichte. Man hatte nämlich Newton den Vorwurf gemacht, dass er die verborgenen Qualitäten der Scholastiker wieder einführe und ausser der Luft keine subtilere Materie zugebe. Um diesem Vorwurf zu entgehen, verfiel er auf folgenden Versuch. Er nahm zwei weite cylindrische Gefässe und hing in jedes ein kleines Thermometer so auf, dass es auf keiner Seite das Glas berührte. Darauf pumpte er ein Gefäss leer und brachte die beiden Glaseylinder von einem kalten Ort in einen warmen; hier fand er das Thermometer im luftleeren Raum ebenso empfindlich wie im luftgefüllten; daher die oben angeführte Frage.



Aethers Ursache der Beugung der Lichtstrahlen, wenn sie an einem festen Körper vorbeigehen?<sup>1)</sup>

In der 21. Quæstion findet sich wiederum eine Aeussertung über die Vermittlung der Gravitation durch den Aether. Sie ist aber von der früher angeführten wesentlich verschieden; es ist hier nicht von dem beständigen Einströmen des Aethers in die Erde die Rede, sondern von der verschiedenen Dichte des Aethers, welche die Schwere verursacht. Wenn nämlich die Dichte des Aethers im Innern eines Himmelskörpers am geringsten ist, dann aber mit der Entfernung nach aussen zunimmt, so müssen die Planeten gegen einander gravitieren und ebenso die Teile eines Himmelskörpers gegen ihn selbst, da ja in einem verschieden dichten Medium alle Körper von den dichteren Teilen nach den dünneren sich bewegen.

Auf die Elastizität des Aethers kann man, wie Newton bemerkt, aus der Schnelligkeit der Aethervibrationen schliessen. Ausgehend von der Schallgeschwindigkeit in Luft, sowie von der von Römer bestimmten Geschwindigkeit des Lichtes im Weltraume findet Newton (wohl unter Voraussetzung, dass der Aether mit der Luft gleiche Dichte habe), dass die Elastizität des Aethers  $49 \cdot 10^{10}$  mal grösser sein müsse als die der Luft. Diese Zahl dürfte zwar jedenfalls zu gross sein, da man keinen Grund hat, den Aether so dicht als die Luft anzunehmen; im Gegenteil, die Erscheinungen verbieten eine derartige Annahme. In der folgenden Frage wird deshalb der Aether auch  $7 \cdot 10^5$  mal dünner angenommen als die Luft.

Mit der Frage, ob nicht auch die Gesichtswahrnehmung, ja selbst die tierischen Bewegungen durch die Vibrationen dieses Mediums erregt werden, hat Newton die Aufzählung der Eigenschaften und Wirkungen des Aethers abgeschlossen<sup>2)</sup>.

Zur Charakteristik des Newton'schen Aethers haben wir indes noch etwas Wesentliches beizufügen. Newton dachte sich den Aether stets atomistisch, mit einem kontinuierlichen Aether wusste er gar nichts anzufangen; ja er hält sogar eine dauernde Bewegung in einem solchen für unmöglich. Er geht nämlich von der Voraussetzung aus, dass die Dichte eines Körpers der Zahl der Poren umgekehrt proportional sei. Deshalb sind Gold und Quecksilber die dichtesten (schwersten) Körper, weil sie sehr wenig Poren haben. Wäre nun der Aether kontinuierlich, also ohne Poren, so müsste er dichter sein als die genannten Körper und deshalb einem in ihm sich bewegenden Körper einen grösseren Widerstand entgegensetzen als Quecksilber. Ein solcher Aether ist deshalb in Ansehung der freien Bewegung der Himmelskörper durchaus zu verwerfen.<sup>3)</sup>

Man wäre geneigt, aus dem Inhalte dieser Fragen den Schluss zu ziehen, Newton habe sich neuerdings der Aetherhypothese zugewendet. Da ist jedoch Vorsicht im Urteil geboten; denn in der 28. Quæstion wirft er die Frage auf, ob nicht alle auf eine Aetherhypothese gegründeten Lichttheorien zu verwerfen seien.<sup>4)</sup> Und in der folgenden Quæstion wird die Emissionstheorie so klar wie sonst nirgends dargelegt.<sup>5)</sup> Dass in seinem Geiste eine gewisse Hinneigung zur Aetherhypothese wiederum stattgefunden, lässt sich freilich kaum in Abrede stellen. Poggendorf ist der Ansicht, man müsse dies zum Teil dem Umstande zuschreiben, dass die Undulationstheorie in Huygens einen besseren und angeseheneren Vertreter gefunden habe, als Hooke es war.<sup>6)</sup> In neuester Zeit wurde

<sup>1)</sup> Optice, Quæst. 18—20. Die Uebersetzung teilweise nach Phys. Zeitschr. I, S. 380, 381, 1901.

<sup>2)</sup> L. c. Quæst. 23, 24.

<sup>3)</sup> L. c. Quæst. 22.

<sup>4)</sup> Annon errantes sunt hypotheses illæ omnes, quibus lumen in pressu quodam seu motu per medium fluidum propagato, consistere fingitur?

<sup>5)</sup> So sagt er: Annon radii luminis exigua sunt corpusecula e corporibus lucentibus emissa?

<sup>6)</sup> Poggendorf, Gesch. der Physik, S. 589.



Newtons Verhältnis zur Undulationstheorie von Cornu<sup>1)</sup> in sicher zu günstigem Lichte dargelegt. Wir wollen aus dessen Rede eine charakteristische Stelle anführen.

„Es ist hauptsächlich das dritte Buch seiner Optik“, sagt Cornu, „welches am meisten seine cartesianische Neigung und insbesondere seine Ratlosigkeit bezeugt. Seine berühmten „Quæstiones“ sind eine so vollständige Aufzählung der Beweise für die Theorie der Lichtwellen (?), dass wir Thomas Young sie später als Beweis für die schliessliche Bekehrung Newtons zu der Wellentheorie anführen sehen. Newton hätte gewiss diesem heimlichen Hange nachgegeben, wenn die unbeugsame Logik seines Geistes es ihm erlaubt hätte; aber nachdem er alle Hilfsquellen aufgezählt hat, über die die Wellentheorie verfügt, um die innerste Natur des Lichtes zu erklären, hält er, bei den letzten Fragen angekommen, wie von plötzlichen Gewissensbissen ergriffen, ein und verwirft sie total. Und das einzige Argument, welches er gibt, ist, dass er keine Möglichkeit sieht, sich nach ihr Rechenschaft von den geradlinigen Lichtstrahlen zu geben.

„Von diesem Standpunkte aus betrachtet, ist das dritte Buch der Optik nicht mehr nur eine unparteiische Diskussion der entgegengesetzten Systeme; es erscheint vielmehr wie die Schilderung der Leiden eines mächtigen Genies, gequält vom Zweifel, abwechselnd von den verführerischen Suggestionen der Phantasie hingerissen und zurückgerufen von den zwingenden Forderungen der Logik. Wir wohnen einem Drama bei, dem ewigen Kampfe zwischen Liebe und Pflicht, und die Pflicht war die stärkere von beiden.“<sup>2)</sup>

Wir stimmen übrigens Cornu vollkommen bei, wenn er sagt: „Newton schwankte zwischen den beiden entgegenstehenden Systemen, da er deren Unzulänglichkeit klar bemerkte; und in dieser Hin- und Hererwägung ist er bemüht, sich so wenig wie möglich von dem Boden sicher gestellter Tatsachen zu entfernen; das ist der Grund, warum er keine dogmatische Theorie aufgestellt hat.“<sup>3)</sup>

Hiemit verlassen wir Newton. Kaum hat je ein Mann der Wissenschaft so viele Gegner und so viele begeisterte Anhänger gefunden wie dieser. Welch' verschiedenes Schicksal haben beispielsweise seine beiden Hauptwerke erfahren! Die Prinzipien haben sich bis auf unsere Zeiten in vollem Ansehen erhalten. Die Optik dagegen hat sich, obwohl sie ein herrliches Denkmal des Geistes ist, der sie geschaffen, in dem, was die physische Natur des Lichtes betrifft, nicht halten können; denn die Emissionstheorie trug von Anfang an die Kennzeichen einer schlechten Theorie an sich, da sie für jede neue Erscheinung eine neue Hilfshypothese ersinnen musste, bis sie endlich vor den immer zahlreicher auftretenden Tatsachen ihre Ungenüge offenbarte und schliesslich durch die inzwischen neuerstandene Undulationstheorie verdrängt wurde.

Wenn wir nun die Zeit von Newton bis zum Ende des 18. Jahrhunderts übergehen, so glauben wir damit kein wesentliches Moment in der Entwicklung der Aetherhypothese ausseracht zu lassen. Euler und die Bernoullis, die in dieser Zeit die Aetherhypothese vertreten, haben wir bereits besprochen.<sup>4)</sup> Die Undulationstheorie, welche die Vorstellungen über den Aether hätte weiter entwickeln müssen, war sozusagen in Vergessenheit geraten, und die Emissionstheorie, die alles beherrschte, brauchte den Aether nicht. Wir finden z. B. in der trefflichen Darstellung der Emissionstheorie, welche W. Herschel in seinem Buche: Vom Licht gibt, den Aether niemals erwähnt. Alle Lichterscheinungen werden hier erklärt durch gegenseitige Einwirkung der Teilchen des Lichtes und der materiellen Körper, die in einer Anziehung und Abstossung besteht, welche sich nach einem Gesetze richtet, das eine Funktion des Abstandes der Teilchen ist.<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> Cornu A., Die Theorie der Lichtwellen und ihr Einfluss auf die moderne Physik; Rede, gehalten im senate house der Universität Cambridge bei der Jubiläumsfeier des H. G. Stokes, am 1. Juni 1900.

<sup>2)</sup> Physikalische Zeitschrift, I, S. 380, 381, 1900.

<sup>3)</sup> A. a. O. S. 381.

<sup>4)</sup> Vergl. I. Teil, S. 26 ff; 42 ff.

<sup>5)</sup> Herschel, Vom Licht, S. 268.



Von den Anhängern der Emissionstheorie heben wir nur Boscovich (aus der Gesellschaft Jesu, 1711—1787) hervor. In seinen naturphilosophischen Anschauungen weicht er allerdings von Newton ab; er ist aber doch ein entschiedener Anhänger der Emissionstheorie. Ueber die Undulationstheorie äussert er sich sehr ungünstig; er hält sie nicht für befähigt, die Erscheinungen des Lichtes zu erklären.<sup>1)</sup> Selbst die Annahme eines feinen, ätherartigen Fluidums bezeichnet er als eine hypothesis precaria.<sup>2)</sup>

Nach seinem Dafürhalten kann auch die Gravitation nicht durch den Druck eines Fluidums erklärt werden; denn ein solches Fluidum müsste der Bewegung der Planeten und Kometen einen grossen Widerstand entgegensetzen. Wollte man aber annehmen, dass es nicht hemmend auf ihre Bewegung einwirke, so wäre auch nicht einzusehen, wie es selbst einen Impuls auf die Körper ausüben könnte.<sup>3)</sup>

An dieser Stelle wollen wir auch noch kurz die Stellung des Königsberger Philosophen Immanuel Kant (1724—1804) zur Aetherhypothese besprechen. Seine diesbezüglichen Ansichten sind in einer Reihe naturwissenschaftlicher und naturphilosophischer Schriften niedergelegt.

Schon in seiner Doktor-Dissertation *Meditationum quarundam de igne succincta delineatio* (1755) führt Kant den Aether als ein die Konstitution der Körper und ihren Aggregatzustand bestimmendes Agens ein. Er dachte sich die einzelnen Massenteilchen diskret, in ein elastisches Medium eingebettet und durch dasselbe zusammengehalten.<sup>4)</sup> Die Materie des Feuers ist nichts anderes als die eben genannte elastische Materie; ihre Undulations- oder Vibrationsbewegung ist dasjenige, was man Wärme nennt.<sup>5)</sup> Mit grösster Deutlichkeit wird dann diese Wärmematerie als Aether- oder Lichtmaterie bezeichnet. Der in den Poren der Körper eingeschlossene Aether weist wegen der Anziehung, welche die gewöhnliche Materie auf ihn ausübt, Verdichtung auf.<sup>6)</sup>

Aus dem Angeführten geht hervor, dass Kant für eine mechanische Erklärung der Wärme einstand; indessen unterscheidet sich seine Ansicht von der neueren dadurch,

<sup>1)</sup> Boscovich spricht über die Natur des Lichtes in der *Theoria philosophiæ naturalis* p. 217 bis 233 und ausführlicher im zweiten Teil der *Dissertatio de lumine*. Zur Kennzeichnung seines Standpunktes heben wir zwei Stellen im Urtext hervor.

Putamus enim lumen nec consistere in pressione quadam, qualem admisit Cartesius, nec in undis in quodam fluido excitatis, uti putavit Hugenius, sed in effluvio tenuissimo, quod e corpore luminoso perpetuo emittitur, et cum tanta illa velocitate progreditur. *Dissert. de lumine*, p. 96. — Und ferner: Ipsa lux potest esse effluviolum quoddam tenuissimum, et quasi vapor fermentatione ignea vehementi excussus. Et sane validissima, meo quidem judicio, argumenta sunt, contra omnes alias hypotheses, ut contra undas, per quas olim phaenomena lucis explicare conatus est Hugenius, quam sententiam diu consepultam iterum excitare conati sunt nuper summi nostri ævi Geometrae, sed meo quidem judicio sine successu: nam explicarunt illi quidem, et satis ægre, paucas admodum luminis proprietates, aliis intactis prorsus, quas sane per eam hypothesim nullo pacto explicari posse censeo, et quarum aliquas ipsi arbitror omnino opponi. *Theoria phil. nat.* p. 217.

<sup>2)</sup> *Theoria phil. nat.* p. 186.

<sup>3)</sup> ... Adeoque id fluidum vel resistantiam ingentem deberet parere planetæ, aut cometæ progredienti, vel ne pressione quidem ullum ipsi sensibilem imprimit motum. *Theor. phil. nat.* p. 182, 183. — Auch Lesage (1724—1803) macht sich in seinem *Lucrèce Newtonien* einen ähnlichen Einwurf, wenn er die Frage stellt, wie es möglich sei, dass die Himmelskörper trotz der überall vorhandenen Atomströme (Annahme Lesages) bei ihrer Bewegung durch den Himmelsraum doch keine Verzögerung dieser Bewegung zeigen. Er löst die Schwierigkeit in folgender Weise: Da die Schwere verursacht wird durch einen Strom von Atomen, welche ihrer Antagonisten beraubt sind, so ist dieselbe unter sonst gleichen Umständen dem Quadrat der Geschwindigkeit dieser Atome proportional. Die Verzögerung, welche die Himmelskörper erleiden, wird dagegen durch das Produkt aus der einfachen Geschwindigkeit der Atome und der Geschwindigkeit der Körper selbst gemessen. Es verhält sich also die Schwere der Himmelskörper zu der Verzögerung ihrer Bewegung, wie die Geschwindigkeit der schwer-machenden Atome zu der Geschwindigkeit der Himmelskörper selbst. Da aber dieses Verhältnis als unendlich klein angenommen werden kann, so ist die Verzögerung der Himmelskörper im Verhältnis zur Schwere derselben unendlich klein und damit unmerklich. *Lucrèce Newtonien* in *Nouv. Mém. de l'Acad. Royal* für 1782; Berlin 1784, p. 422, 423; Uebersetzung nach Rosenberger, *Gesch. Bd. III*, S. 24, woselbst sich eine Darstellung und Kritik der Gravitationstheorie Lesages findet, worauf wir verweisen.

<sup>4)</sup> Corpora dura, haud secus, quam fluida, moleculis continentur non immediato contactu, sed materia elastica pariter mediante coherrentibus. *De igne, Propositio III.* Werke, Bd. VIII, S. 387.

<sup>5)</sup> Materia ignis non est, nisi materia elastica, quæ corporum quorumlibet elementa, quibus intermixta est, colligat; ejusque motus undulatorius seu vibratorius id est, quod caloris nomine venit. *De igne. Prop. VII.* Werke, VIII, 392, 393.

<sup>6)</sup> Materia caloris non est nisi ipse æther (seu lucis materia). *L. c. Prop. VIII.* Werke, VIII, S. 394.



dass er die Wärme als eine Bewegung der Teilchen des Aethers und nicht als eine Bewegung der Teilchen der ponderablen Materie auffasste. Und wenn er den Aether Licht- und Wärmematerie nennt, so ist dies nicht im Sinne einer Emanationstheorie aufzufassen; der Aether ist ihm nur insofern Materie des Lichtes und der Wärme, als dieser das materielle Substrat, der Träger der Bewegung ist.

Kant äussert sich auch zu Gunsten der Undulationstheorie des Lichtes in dem Sinne, dass sie den Naturgesetzen sehr entspreche.<sup>1)</sup>

Die damals der Undulationstheorie anhaftende Schwierigkeit betreffs der geradlinigen Fortpflanzung ist auch Kant nicht entgangen. Sie veranlasste ihn, sich den Aether als kontinuierliches Fluidum vorzustellen. Nach seiner Ansicht rührt nämlich die genannte Schwierigkeit von dem Umstande her, dass man sich den Aether in mathematischem Sinne als eine Anhäufung von Kügelchen vorstellte; diese Kügelchen würden nun allerdings je nach ihrer verschiedentlich schiefen Lage gegen die Richtung des Stosses Seitenbewegungen des Lichtes geben. Wie er meint, könnte man sich aber diese Materie ganz gut als ursprünglich flüssig und zwar durch und durch flüssig denken, ohne dass sie in feste Körperchen zerteilt wäre.<sup>2)</sup>

In Kants Naturphilosophie spielte der Aether eine sehr wichtige Rolle. Das geht daraus hervor, dass er ihm noch in einem unvollendeten Werke die grösste Aufmerksamkeit zuwandte.<sup>3)</sup> Wir beschränken uns darauf, die daselbst niedergelegten Ideen über die Eigenschaften und Wirkungen des Aethers nach Rosenberger mitzuteilen.

Der Aether ist ihm der Stoff, der die Bedingung zur Möglichkeit der Physik bildet. Er ist eine im ganzen Weltraum als ein Continuum verbreitete, alle Körper gleichförmig durchdringende, erfüllende (mithin keiner Ortsveränderung unterworfen) Materie, welche, man mag sie nun Aether oder Wärmestoff etc. nennen, kein hypothetischer Stoff ist, ... sondern ein Stoff, der als ein zum Uebergang von den metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft zur Physik notwendig gehörendes Stück a priori erkannt und postuliert werden kann. Der Aether oder Wärmestoff ist eine *materia primitivæ movens*, sie kann nicht fest oder flüssig, nicht koerzibel, sondern nur durch ihre eigene Attraktion und Repulsion (durch die metaphysischen Kräfte) beständig bewegt sein. Da dem Aether keine ortsverändernde Bewegungen eigen sind, so kann er nur in sich Schwingungen machen, die eben durch seine primitiven Kräfte erzeugt bis in alle Ewigkeit fortdauern<sup>4)</sup>. Betreffs der Imponderabilität des Aethers äussert sich Kant folgenderweise: Eine absolut imponderable Materie ist ein Widerspruch mit sich selbst; denn es wäre eine bewegende Kraft ohne alle Quantität derselben. Dabei aber lässt sich gar wohl eine relativ oder bedingt ponderable Materie denken, für welche keine Wage möglich sein würde, wenn nämlich diese Materie inkoerzibel wäre. Eine solche Materie ist der Aether. Er ist unwägbare, weil er als eine im unendlichen Raume überall gleich verbreitete, nicht

<sup>1)</sup> Hypothesis naturae legibus maxime congrua. L. c. Werke, VIII. p. 394, 395.

<sup>2)</sup> Metaphys. Anfangsgründe d. Naturw. Werke, VIII, S. 508, 509.

<sup>3)</sup> Das Werk sollte den Titel tragen: Vom Uebergang von den metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft zur Physik. Erschienen z. T. in der altpreussischen Monatsschrift, Bd. 19, 20, 21.

<sup>4)</sup> Herbart schreibt dem Aether ebenfalls Schwingungsbewegungen zu; nach ihm gerät er nämlich durch den Wechsel der Attraktion, die er gegen die Massen der Weltkörper in allen Elementen ausübt, und durch die Repulsion, in welche er selbst durch sein eigenes Zusammentreffen in diesen Elementen versetzt wird, in eine oszillierende Bewegung, die sich bis in unendliche Entfernung ausbreitet. Die Schwere leitet Herbart aus diesen Schwingungen des Aethers in folgender Weise ab. Jeder Körper, darf man vermuten, veranlasst den Aether zu einem besonderen System von Schwingungen; aber mehrere Körper zusammengenommen veranlassen in weiter Ferne mehr und mehr ein solches System von Schwingungen, als ob dasselbe von ihrem gemeinschaftlichen Schwerpunkt ausgehe. Daher treibt die Rückwirkung des schwingenden Aethers sie wirklich gegen ihren gemeinschaftlichen Schwerpunkt hin, und je näher sie demselben kommen, desto vollkommener passen die Schwingungen zu ihrer Lage. Rosenberger, Gesch. der Phys. Bd. III, S. 170, 171. — Herbarts Erklärung ähnelt einigermaßen der von Hooke gegebenen und zwar besonders auch darin, dass ihr die Anschaulichkeit fehlt.



blos alle Körper umgebende, sondern auch innigst durchdringende Materie vorgestellt wird, die freilich nirgends hinfallen oder wägen kann.<sup>1)</sup>

Wir haben schon oben kurz angedeutet, dass nach Kant der Aether auch den Aggregatzustand der Körper bestimme. Aller Zusammenhang des Tropfbarflüssigen, sagt er, wie des Festen kann nur durch die bewegende Kraft des Aethers erklärt werden. Selbst die Kugelgestalt freier Flüssigkeiten ist eine Folge der Aetherstösse; denn das Flüssige muss diesen Stössen so lange weichen, bis die Berührung der Teile untereinander die grösste und die mit dem leeren Raume die kleinste ist, d. h., bis der Tropfen Kugelgestalt angenommen hat.<sup>2)</sup> Es ist also blos der kontinuierlich im zitternden und erschütternden Zustande alle Materie durchdringende Wärmestoff, also eine lebendige Kraft der Materie, die Ursache der Phänomene der tropfbaren Flüssigkeit als einer solchen. Aber auch der Zusammenhang der starren Körper wird durch die bewegende Kraft des Wärmestoffes bedingt.<sup>3)</sup>

Endlich erklärt Kant aus der Wirkung des Aethers den Uebergang des Festen ins Flüssige und umgekehrt, ferner die Anziehung zwischen dem Festen und Flüssigen und die Erscheinungen der Kapillarität. Die Schwere hätte er jedenfalls auch durch den Aether erklären müssen; er spricht sich aber nicht deutlich darüber aus. Rosenberger orientiert an citierter Stelle in Kürze über die Stellung, welche der Aether im naturphilosophischen Systeme Kants einnimmt.

Während also für Kant der Aether ein einigendes Prinzip im Naturganzen war, ist die Schule Newtons nach Beseitigung des Aethers der Pflanzgarten der Imponderabilien gewesen. Der wägbaren Materie schrieb man als Ureigenschaft nur die Gravitation zu. Die anderen anziehenden und abstossenden Kräfte wie Elektrizität, Licht und Wärme konnten der wägbaren Materie nicht mehr beigelegt werden. Dafür erfand man die Imponderabilien. Die Theorie derselben wurde am Ende des 18. Jahrhunderts ausgebildet und dauerte bis in die ersten zwanzig Jahre des 19. Jahrhunderts, wo man dann anfang, namentlich infolge des Prinzips von der Kräftetransformation und der Erhaltung der Energie, eines nach dem anderen aufzugeben.<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Rosenberger, a. a. O., S. 39, 40.

<sup>2)</sup> Descartes hatte seiner Zeit schon die Kugelgestalt der Wassertropfen durch den Druck des zweiten Elementes erklärt. *Principia philosophiae*, IV, § 16.

<sup>3)</sup> Rosenberger, a. a. O., S. 39, 40. In den metaphysischen Anfangsgründen der Naturwissenschaft gibt Kant der Vermutung Ausdruck, es möchte der Aether selbst einer noch allgemeineren Kraft unterworfen sein; er sagt nämlich: „Die Meinung, dass die Anziehung, die man zur Erklärung des Zusammenhangs der Materie annimmt, nur scheinbare, nicht wahre Anziehung sei, vielmehr etwa blos die Wirkung einer Zusammendrückung durch äussere im Weltraum allenthalben verbreitete Materie, welche selbst nur durch eine allgemeine und ursprüngliche Anziehung, nämlich die Gravitation, zu diesem Druck gebracht wird, hat manche Gründe für sich. *Metaphys. Anfangsgr. Werke*, Bd. VIII, S. 566.

<sup>4)</sup> Man vergleiche Rosenberger, *Gesch.* Bd. III, S. 2 ff.





## II. Kapitel.

# Der Aether in der Undulationstheorie von ihrer Wiederaufnahme bis zu ihrem vollständigen Siege.

Newton hatte im fragmentarischen Anhang zu seiner Optik eine gewisse Hinneigung zur Undulationstheorie gezeigt. Seine diesbezüglichen Aeusserungen waren indessen nicht imstande, der Undulationstheorie neue Freunde zu erwerben, umso mehr als am gleichen Orte noch bestimmter gehaltene Aeusserungen zu Gunsten der Emissionstheorie sich finden, die denn auch mehr Beachtung fanden und gegen die Undulationstheorie in die Wagschale fielen. Und doch sollten diese erstgenannten Aeusserungen etwa 100 Jahre später nicht ohne Bedeutung sein, als der Undulationstheorie in Thomas Young (1773 bis 1829) ein ebenso begabter als begeisterter Anhänger erstand. Young war sich jedoch seiner Sonderstellung wohl bewusst; denn gerade in England, wo der Newtonkultus noch in voller Blüte war, musste ein Versuch, gegen die durch das Ansehen ihres Begründers und die Zeit geheiligte Emissionstheorie aufzutreten, zum voraus erfolglos erscheinen. Er versuchte deshalb, sich auf dieselbe Autorität zu stützen, indem er nachweisen wollte, dass der fragmentarische Anhang der Optik Newtons schon die Beweise für die Undulationstheorie enthalte. Wenn man also diese Anschauungen wieder aufnehme, entferne man sich nicht allzusehr vom Boden, auf dem Newton selbst gestanden.

Nachdem sein Auftreten auf diese Weise wenigstens einen Schein der Berechtigung erhalten hatte, griff Young die Emissionstheorie in zwei Punkten an; er stellte die Frage, woher es komme, dass das Licht von verschiedenen starken Lichtquellen mit derselben Geschwindigkeit ausgeschleudert werde, und wie es sich nach der Emissionstheorie erklären lasse, dass von den Lichtstrahlen, die in jeder Hinsicht von der gleichen Beschaffenheit sind, beim Auftreffen auf ein anderes durchsichtiges Medium immer ein Teil reflektiert wird, während ein anderer Teil in dasselbe eintritt? Die Undulationstheorie gestatte, beide Erscheinungen aus der in einem Medium immer gleichen, in verschiedenen Medien aber verschiedenen Dichtigkeit des Aethers abzuleiten.<sup>1)</sup> Dabei entging Young die Schwierigkeit nicht, welche die Erklärung der Farben nach der Undulationstheorie bot; er glaubte aber, eine genauere Kenntnis der Eigenschaften elastischer Flüssigkeiten würde auch da zu einer befriedigenden Lösung verhelfen.<sup>2)</sup>

Das Licht ist also nach Young eine Wellenbewegung des Aethers, der als feines, elastisches Fluidum den ganzen Raum erfüllt und alle materiellen Körper mit geringem oder gar keinem Widerstande durchdringt, etwa so, wie der Wind durch die Blätter eines Baumes geht.<sup>3)</sup> Die Teilchen des Aethers sind an sich in Ruhe und kehren in dieselbe zurück, nachdem sie eine Erschütterung erfahren haben.

<sup>1)</sup> Hier zeigt sich noch einige Unklarheit; die Krystalloptik hat nämlich bald nachher gezeigt, dass nur in einem isotropen Medium Dichte- und Elastizitätsverhältnisse konstant sind.

<sup>2)</sup> Rosenberger, Gesch. Bd. III, S. 140.

<sup>3)</sup> Lloyd, a. a. O., S. 19.



Auf seine verdienstreichste Entdeckung, das Prinzip der Interferenz, wurde Young durch akustische Studien geführt, und er durchschaute sofort die ganze Tragweite, welche diese Entdeckung für die Entwicklung der Optik haben sollte. Ueber seine diesbezüglichen Untersuchungen äusserte er sich in folgender Weise: „Wenn sie auch niemand selbst von Nutzen wären, so würde ich doch meine Mühe nicht für verloren ansehen; denn ich schmeichle mir, dass die Folgerungen in Bezug auf die Theorie der Farben, zu denen sie mich geführt haben, ein neues Licht auf die interessantesten Teile der Optik werfen werden.“<sup>1)</sup>

In der Tat wandte Young dieses Prinzip auf die Newton'schen Farbenringe an, wobei ihm die Messungen Newtons treffliche Dienste leisteten. Die anfangs befremdende Erscheinung, dass sich im reflektierten Lichte in der Mitte der Ringe ein schwarzer Fleck zeigt, also vollständige Interferenz eintritt, obgleich kein Gangunterschied des einfallenden und reflektierten Strahls vorhanden ist, führte ihn zur Hypothese, dass bei einer der beiden Reflexionen eine halbe Wellenlänge verloren gehe, mit anderen Worten, dass das Vorzeichen der Geschwindigkeit bei der Vibrationsbewegung des Aethers sich ändere. Da der Versuch selbst nicht entschied, bei welcher der beiden Reflexionen der Zeichenwechsel stattfindet, so schloss Young aus der Erscheinung beim Stoss elastischer Körper, dass der Zeichenwechsel bei der Reflexion am optisch dichteren Medium statfinde. Diese Erwägung führte ihn auch zu einem Schluss über die Dichte des Aethers in verschiedenen Körpern. Gehorcht nämlich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes einem ähnlichen Gesetze, wie die des Schalles, gilt also für sie der Ausdruck

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}}$$

wo  $e$  die Elastizität und  $d$  die Dichte des Aethers bezeichnet, so folgt, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Quadratwurzel aus der Dichte des Aethers umgekehrt proportional ist, und da nach der Wellentheorie des Lichtes die Fortpflanzungsgeschwindigkeit auch dem Brechungsexponenten umgekehrt proportional ist, so ist die Dichte des Aethers in jenem Körper beträchtlicher, in welchem der Strahl sich dem Einfallslot nähert: das optisch dichtere Medium hat also auch grössere Aetherdichte. Ausserdem nahm Young an, dass die Elastizität des Aethers in verschiedenen Medien konstant und dass nur die Dichte verschieden sei.<sup>2)</sup>

In der mechanischen Analogie, welche Young für den Verlust einer halben Wellenlänge anführte, verglich er die Reflexion und Brechung mit dem Stoss zweier vollkommen elastischer Kugeln. Der einfallende Strahl ist die stossende Kugel vor dem Stoss, der reflektierte Strahl dieselbe Kugel nach dem Stoss, der gebrochene Strahl ist die gestossene Kugel, die anfänglich in Ruhe war.<sup>3)</sup>

Die mathematische Behandlung dieser Frage liefert, wie man weiss, für die Schwächungskoeffizienten beider Medien entgegengesetzte Vorzeichen, was einer Phasenverschiebung von  $180^\circ$  gleichkommt. Allerdings ist damit noch nichts über die physische Ursache der Erscheinung festgestellt.

Nicht geringe Schwierigkeit machte Young die Erscheinung der Dispersion, ohne dass seine Erklärungsversuche von Erfolg gekrönt waren. Unter anderem suchte er die Schwierigkeit dadurch zu heben, dass er die Schwingungen der ponderablen Teilchen des brechenden Mittels zu Hilfe nahm; dadurch sollte die Geschwindigkeit der Aetherschwingungen innerhalb des Mittels so beeinflusst werden, dass ein Unterschied der

<sup>1)</sup> Rosenberger, Gesch. Bd. III, S. 141.

<sup>2)</sup> Verdet-Exner, Wellentheorie des Lichtes, Bd. I, S. 22, 23.

<sup>3)</sup> Eine ausführlichere Darstellung dieser Gedanken gibt Fresnel im Supplément à la traduction française de la chimie de Thomson. Oeuvres de Fresnel, Tom II, p. 74—76.



Fortpflanzung für verschiedene Farben entstehen würde. Schon Herschel machte die Bemerkung, dass diese Annahme nicht die gehörige Wahrscheinlichkeit besitze.<sup>1)</sup>

Merkwürdigerweise hat das Phänomen der Diffraction, welches Fresnel etwas später in so vollständiger Weise löste, Young anfangs zur Annahme veranlasst, dass die Ursache der Beugung eine ätherartige Atmosphäre sei, welche die Körper umgebe und mit der Entfernung an Dichtigkeit abnehme. Später führte er aber das Phänomen auf die Grundeigenschaft der Wellen zurück.<sup>2)</sup>

Der Hypothese der Transversalschwingungen des Aethers, welche schliesslich der Undulationstheorie zum Siege verhalf, stand Young nicht teilnahmslos gegenüber. Angeregt wurde er durch die im Jahre 1808 von Malus entdeckte Polarisation durch Reflexion oder durch die von Brewster aufgefundenen Eigenschaften zweiachsiger Krystalle.

Es verdient hervorgehoben zu werden, dass die Erscheinung der Polarisation nun zum zweiten mal der Undulationstheorie wie ein drohendes Hemmnis entgegentrat. Huygens hatte damals, als er in edler Offenheit sein Unvermögen, diese Erscheinung zu erklären, eingestand, zugleich bemerkt, es werde wohl nötig sein, in der Undulationstheorie noch weitere Voraussetzungen zu machen. Die entscheidende Voraussetzung wurde dann mit den Transversalschwingungen in die Optik eingeführt, und sie genügte vollkommen. Es trat damit die innere Wahrscheinlichkeit der Undulationstheorie immer mehr zu Tage, da sie auf so einfachen Grundlagen die immer zunehmende Zahl von Erscheinungen zu erklären vermochte, während die Emissionstheorie immer verwickelter wurde.

Im Jahre 1818 schrieb Young an Arago, dass er über die Art nachgedacht habe, auf Grund der Undulationstheorie eine leidliche Erklärung der Polarisation zu geben. Als dann spricht er von der Möglichkeit einer transversalen Vibration, die in Richtung des Radius fortgepflanzt wird, während die Bewegungen der kleinsten Teilchen in einer bestimmten konstanten Richtung zu diesem Radius liegen; und dies sei die Polarisation.<sup>3)</sup>

Wir werden bald sehen, dass Fresnel in der Hypothese der Transversalschwingungen einen eigentlichen Entwicklungsprozess durchgemacht. Ebenso scheint Young, wenn auch in geringerem Masse, an diesem Prozesse teilgenommen zu haben, ohne sich zu einer eigentlichen Theorie durchgearbeitet zu haben, da seine Aeusserungen mehr den Charakter von Vermutungen an sich tragen. Vor dem genannten Brief an Arago betrachtete es nämlich Young als Unmöglichkeit, in einem elastischen Medium eine Kraft zu finden, die ähnlich der Schwere auf der Oberfläche Transversalschwingungen herbeiführen könnte. Transversalschwingungen könnten daher nicht Anspruch darauf erheben, eine physische Erklärung der Lichterscheinungen zu geben; höchstens hätten sie etwelchen Nutzen für ihre mathematische Behandlung.<sup>4)</sup> Uebrigens war die Schlussfolgerung vom Standpunkte Youngs aus nicht unkonsequent, da er sich den Aether als Flüssigkeit vorstellte, in welcher ohne weitere Voraussetzungen Transversalschwingungen dauernd nicht existieren können. Im Jahre 1827 soll er dann bei näherer Prüfung der Ideen Fresnels zum Schlusse gekommen sein, dass der Aether nicht nur sehr elastisch, sondern fest sein müsse.<sup>5)</sup>

Youngs Verdienste um die Undulationstheorie sind ganz bedeutend, obgleich es ihm allein kaum gelungen wäre, ihr zum Siege zu verhelfen. Ohne Zweifel hätte er noch Grösseres geleistet, wenn er seine geradezu staunenerregenden Fähigkeiten auf das Gebiet der Optik konzentriert, und wenn er seine Darstellungsweise mehr dem Geschmacke des

<sup>1)</sup> Herschel, Vom Licht, S. 298.

<sup>2)</sup> Lloyd, a. a. O., S. 60.

<sup>3)</sup> Whewell, Geschichte der induktiven Wissenschaften, Bd. II, S. 450.

<sup>4)</sup> Oeuvres de Fresnel, Tom. I, p. 635.

<sup>5)</sup> Ibid. Tom. I, p. 635.



gelehrten Publikums angepasst hätte, wie es gleichzeitig Fresnel getan, der denn auch einen der ersten Plätze in der Geschichte der Optik einzunehmen verdient.

Augustin Fresnel (1788—1827) war Ingenieur von Beruf; aber die Vorliebe für mathematische und physikalische Fragen blieb ihm auch in seinem Berufsleben, das ihm, aus einigen Aeusserungen zu schliessen, nicht besonders zusagte. Notizbücher aus den ersten Jahren seiner Berufstätigkeit enthalten schon zahlreiche Einwürfe gegen die Emissionstheorie, sowie Hypothesen und Rechnungen über die Wellenbewegung des Lichtes.<sup>1)</sup> Es scheint auch, dass Fresnel im Jahre 1814 angefangen habe, sich ernstlich mit optischen Fragen zu beschäftigen. Aus diesem Jahre datiert nämlich ein Brief an seinen Bruder Léonor, worin er ihn bittet, ihm die Physik von Haüy und eine Abhandlung Biots über die Polarisation des Lichtes zu übersenden. Obwohl Malus seine Entdeckungen über die Polarisation bereits in den Jahren 1808 und 1810 veröffentlicht hatte, gesteht Fresnel, dass er von der Polarisation nichts wisse.<sup>2)</sup> Mit welcher Schnelligkeit er sich aber in das Gebiet der Optik hineingearbeitet hat, beweist der Umstand, dass er schon im folgenden Jahre der Akademie der Wissenschaften eine Abhandlung über die Diffraktion vorlegte.

Die wissenschaftliche Tätigkeit Fresnells kann in drei Perioden eingeteilt werden. Die erste umfasst seine Arbeiten bis zu den gemeinschaftlich mit Arago angestellten Versuchen über Interferenz des polarisierten Lichtes und kennzeichnet sich als die Periode der Longitudinalschwingungen. In die zweite Periode fallen seine Arbeiten über die Polarisationserscheinungen, hochwichtig durch die Idee der Transversalwellen und die allmähliche Entwicklung dieser neuen Hypothese. Die dritte Periode endlich füllen seine Arbeiten über die Doppelbrechung in Krystallen und endigen mit einer vollständigen Theorie derselben.

Wie alle früheren Anhänger der Undulationstheorie fasste anfänglich auch Fresnel die Lichtschwingungen als den Schallwellen ganz analoge, aus Verdichtungen und Verdünnungen bestehende Wellen auf. Diese Annahme bedingte bezüglich des Trägers der Bewegung, des Aethers, die weitere Voraussetzung, dass er ein sehr feines, elastisches, kompressibles Fluidum sein müsse. Er nannte dieses Fluidum Wärmestoff (*calorique*) und legte es den Licht- und Wärmeerscheinungen zu Grunde.<sup>3)</sup>

Die verdienstreichste Arbeit Fresnells in dieser Periode war die Vereinigung des Prinzips von Huygens mit dem Prinzip der Interferenz. Letzteres hatte Fresnel, ohne die diesbezüglichen Arbeiten Youngs zu kennen, selbständig aufgefunden. Abweichend von den Mathematikern, die gewöhnlich die Entstehung und Bewegung nur einer Welle in Betracht zogen, fasste Fresnel eine ganze Reihenfolge von Wellen ins Auge. Dies entspricht auch dem Vorgange in der Natur. Sobald nämlich der Aether geringere Dichte hat als das Körperteilchen, welches durch seine Schwingungen das Licht erregt, muss eine ganze Folge von Vibrationen im umgebenden Aether entstehen. Dass aber der Aether so geringe Dichte hat, beweist schon der ungestörte Lauf der Himmelskörper in diesem Fluidum.<sup>4)</sup>

Die schon öfter erwähnte Schwierigkeit der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes in der Undulationstheorie wurde von Fresnel durch den Nachweis des nachfolgenden Satzes gehoben: Die von den verschiedensten Punkten einer Welle nach dem Huygens'schen Prinzip zu einem ausserhalb derselben liegenden Punkte sich fortpflanzenden Wellen-

<sup>1)</sup> Oeuvres, Tom. I, p. 5.

<sup>2)</sup> J'ai beau me casser la tête, je ne devine pas ce que c'est, gesteht er in diesem Briefe betreffs der Polarisation. Oeuvres, II, 819.

<sup>3)</sup> Il est bien naturel de penser que la chaleur et la lumière sont uniquement dues aux vibrations du calorique. Ibid. I, 59.

<sup>4)</sup> Ibid. I, 285.



bewegungen heben sich durch Interferenz so auf, dass nur die Bewegung übrig bleibt, welche von dem Elemente der ursprünglichen Welle ausgeht, das auf dem Radius liegt, der den Mittelpunkt der Welle mit dem ausserhalb liegenden Punkte verbindet.<sup>1)</sup> Es kann nämlich dargetan werden, dass die ursprüngliche Kugelwelle sich so in Zonen teilen lässt, dass die Entfernungen zweier benachbarter Zonen vom Punkte um eine halbe Wellenlänge differieren, und dass daher vollständige Vernichtung der Wellenbewegung stattfindet mit Ausnahme der vom oben erwähnten Elemente ausgehenden Wellenbewegung.<sup>2)</sup>

Nachdem Fresnel zu einer alle Erscheinungen umfassenden Theorie der Diffraction gelangt war, erkannte er klar, dass die Emissionstheorie eine gleichwertige Erklärung nicht geben könne. War er somit von der Wellennatur des Lichtes fest überzeugt, so

<sup>1)</sup> Siehe Wüllner, Physik, Bd. IV. S. 613.

<sup>2)</sup> Ist B der Punkt ausserhalb einer Kugelwelle vom Radius  $a$ , so erhält man mit Anwendung des Satzes von Guldin für eine Zone von der Breite  $a d\varphi$

$$2 \pi a^2 \sin \varphi d\varphi$$

und für eine Zone vom Winkel  $\varphi_1$

$$2 \pi a^2 \int_0^{\varphi_1} \sin \varphi d\varphi \quad (a)$$

Es ist aber

$$u^2 = a^2 + (a+b)^2 - 2a(a+b) \cos \varphi.$$

Differenzieren wir noch  $u$  und  $\varphi$ , so erhalten wir

$$2u du = 2a(a+b) \sin \varphi d\varphi$$

oder

$$\sin \varphi d\varphi = \frac{u du}{a(a+b)}$$

Setzt man diesen Wert in (a) ein, so ist

$$\text{Zone } \varphi_1 = \frac{2\pi a}{a+b} \int_{u_0}^{u_1} u du$$

oder

$$\text{Zone } \varphi_1 = \frac{\pi a}{a+b} (u_1^2 - u_0^2) = \frac{\pi a}{a+b} (u_1 + u_0) (u_1 - u_0)$$

Wenn nun die Entfernungen  $u_0, u_1, u_2 \dots$  um  $\frac{\lambda}{2}$  differieren, so haben die Zonen 1, 2, 3 ... als Oberflächen

$$\frac{\pi a}{a+b} (u_0 + u_1) \frac{\lambda}{2}, \quad \frac{\pi a}{a+b} (u_1 + u_2) \frac{\lambda}{2}, \quad \frac{\pi a}{a+b} (u_2 + u_3) \frac{\lambda}{2} \dots$$

Sie verhalten sich also wie

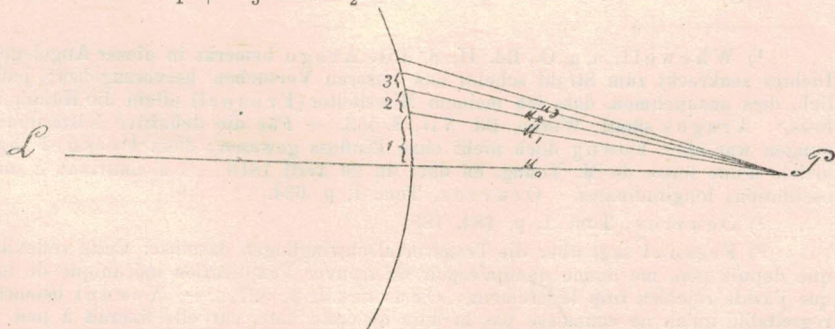
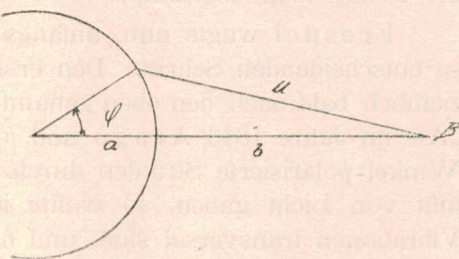
oder wie

$$u_0 + u_1 : u_1 + u_2 : u_2 + u_3 \\ 2u_0 + \frac{\lambda}{2} : 2u_0 + \frac{3\lambda}{2} : 2u_0 + \frac{5\lambda}{2}$$

Nennen wir die drei ersten Zonen  $F_1, F_2, F_3$ , so ist offenbar

$$F_1 + F_3 = 2F_2.$$

Halbiert man die erste und dritte Zone, so ist die zweite Zone diesen beiden Hälften flächengleich. Es gehen also nach dem Prinzip von Huygens von  $F_2$  ebenso viele Elementarwellen aus als von den beiden angrenzenden Hälften der Zonen  $F_1$  und  $F_3$ , und da nach Voraussetzung die Entfernungen von  $P$  um eine halbe Wellenlänge differieren, so heben sich alle davon ausgehenden Wellen durch Interferenz auf. Wirksam bleibt nur die Hälfte der ersten Zone, die am Radius liegt, welcher den Mittelpunkt der Welle mit  $P$  verbindet,





machte er doch keine weitere Voraussetzung, als dass auch die Lichtwellen interferenzfähig seien. Es waren übrigens seine Anschauungen über das Wesen des Lichtes so lose mit seinen mathematischen Erörterungen verknüpft, dass er später bei Voraussetzung transversaler Schwingungen an seinen früheren Arbeiten nichts zu ändern brauchte.

In eine neue, geradezu entscheidende Entwicklungsphase trat die Undulationstheorie durch die Einführung der Transversalschwingungen, die ihrerseits neue Anschauungen über die Konstitution des Aethers bedingten.

Im Jahre 1816 unternahmen Fresnel und Arago gemeinschaftlich Untersuchungen über die Interferenz des polarisierten Lichtes. Das Resultat bildeten fünf Gesetze, von denen das zweite lautet: „Senkrecht zu einander polarisierte Lichtstrahlen können nie zur Interferenz gebracht werden.“ Vor dieser überraschenden Tatsache stand die Undulationstheorie mit ihren longitudinalen Schwingungen ebenso ratlos, wie vor einer Erklärung der Polarisation überhaupt.

Fresnel wagte nun, anfangs freilich sehr zaghaft, den für die Undulationstheorie so entscheidenden Schritt. Den ersten Gedanken an Transversalschwingungen scheint er ziemlich bald nach den oben genannten Versuchen gefasst zu haben; denn er erzählt selbst: „Als im Jahre 1816 Arago und ich die Bemerkung machten, dass zwei unter rechtem Winkel polarisierte Strahlen durch ihre Wiedervereinigung immer wieder dieselbe Quantität von Licht gaben, so wollte ich dies durch die Voraussetzung erklären, dass die Vibrationen transversal sind, und dass sie unter rechtem Winkel gegen einander stehen, wenn die Strahlen unter rechtem Winkel polarisiert sind. Eine solche Hypothese war aber mit den bisher angenommenen Ideen über die Natur der Vibrationen eines elastischen Mediums so wenig übereinstimmend, dass ich anstand, sie anzunehmen, bis ich sie mit den übrigen Begriffen der Mechanik in nähere Uebereinstimmung bringen konnte. Young aber, kühner in seinen Konzeptionen und weniger vertrauend auf bloß geometrische Ansichten, machte diese Idee vor mir bekannt, obschon er sie vielleicht erst nach mir gedacht hat.“<sup>1)</sup>

Wie sehr Fresnel an die Hypothese der Longitudinalschwingungen gewöhnt war, verrät seine Aeusserung, dass Transversalschwingungen, die durch Interferenz von nicht genau parallelen Strahlen entstehen müssen, unsichtbar seien, und zwar nicht nur deswegen, weil sie an sich zu schwach seien, sondern eher noch wegen ihrer Richtung.<sup>2)</sup> Er zweifelte also daran, ob Transversalwellen auf den Sehnerv einwirkten, gerade wie man nachher, als die Transversalschwingungen angenommen waren, die nunmehr lästigen Longitudinalschwingungen durch die Annahme beseitigen wollte, dass sie auf die Retina keine Wirkung ausübten.

Der Zeitpunkt, wo Fresnel sein Urteil über die Transversalität der Lichtschwingungen abgeschlossen hatte, lässt sich kaum angeben. Eine darauf bezügliche Note trägt leider kein Datum.<sup>3)</sup> Jedenfalls darf man sagen, dass Fresnel bald nach jenen Untersuchungen über die Interferenz des polarisierten Lichtes sich mit der Hypothese der Trans-

<sup>1)</sup> Whewell, a. a. O., Bd. II, S. 451. Arago bemerkt in dieser Angelegenheit: „Die Wellenbewegung des Lichtes senkrecht zum Strahl scheint aus unseren Versuchen hervorzugehen; jedoch erschien es mir so bedenklich, dies anzunehmen, dass ich meinem Mitarbeiter (Fresnel) allein die Kühnheit einer solchen Folgerung überliess.“ Aragos sämtl. Werke, Bd. VII, S. 553. — Für die definitive Lostrennung von den Longitudinalschwingungen war aber Young doch nicht ohne Einfluss gewesen; denn Fresnel sagt selbst: Je dois dire ici qu'un article d'une lettre de M. Young, en date du 29 avril 1818 . . . a contribué à me faire douter de l'existence des oscillations longitudinales. Oeuvres, Tom. I, p. 634.

<sup>2)</sup> Oeuvres, Tom. I, p. 184, 185.

<sup>3)</sup> Fresnel sagt über die Transversalschwingungen daselbst: Cette reflexion bien simple, que je n'ai faite que depuis peu, me donne quelque espoir de trouver l'explication mécanique de la polarisation dans des hypothèses que j'avais rejetées trop légèrement. Oeuvres I, p. 527. — Verdet bemerkt dazu in der Fussnote; Il est regrettable qu'on ne connaisse pas la date de cette note, car elle fixerait à peu près l'époque où Fresnel a définitivement adopté l'hypothèse des vibrations transversales.



versalschwingungen zu beschäftigen begann und schnell für dieselbe eingenommen wurde. Wenn er dann erst im Jahre 1821 diese neue Hypothese in bestimmter Weise vortrug, so hat dies seinen Grund in Umständen, auf die wir jetzt etwas eingehen müssen.

Nachdem er einmal erkannt hatte, dass die Nichtinterferenz senkrecht zu einander polarisierten Lichtes nur mit Voraussetzung transversaler Schwingungen erklärt werden könne, machte er den Schluss, dass solche Schwingungen im Lichtäther vorhanden sein müssten und deswegen auch möglich seien, wenn auch die bisherigen Meinungen das Gegenteil aussprachen.

In der Tat vertraute Fresnel mehr auf seine Experimente und auf die Folgerungen, die aus einer als wahr erkannten Tatsache sich ergaben als auf die theoretischen Resultate der damaligen grossen Mathematiker. Er sagt diesbezüglich: Wenn die Tatsachen uns nötigen, die Lichterscheinungen als transversal anzunehmen, so ist es sicherer, sich hier auf das Experiment zu stützen, als auf die leider noch sehr unvollkommene Kenntnis, welche die Mathematiker bislang von den Schwingungen in elastischen Flüssigkeiten gehabt haben.

In der Folge entspann sich zwischen Fresnel und Poisson eine Kontroverse; denn die Mathematiker hielten Transversalschwingungen in einer Flüssigkeit für eine mechanische Absurdität. Poisson hatte als Resultat seiner Untersuchungen über Wellen in elastischen Flüssigkeiten angegeben, dass jede erheblich weit von ihrem Ursprunge fortgeschrittene Welle, die sich kugelförmig ausbreitet, keine anderen Vibrationen der Teilchen haben könne als solche, die fast genau senkrecht gegen jene Kugelfläche sind. Fresnels Quervibrationen liessen sich daher aus den Gesetzen der Elastizität gar nicht ableiten. Die Annahme von Querschwingungen müsste zuerst durch Auffindung der Kräfte, welche sie hervorbringen, gerechtfertigt werden. Auch bei sphäroidalen Undulationen in Körpern, wo die Elastizität des Aethers nicht nach allen Richtungen konstant ist, können demnach keine Vibrationen der Teilchen in Richtung der Tangente der Welle, sondern nur in Richtung der Normale stattfinden, und so gut sich die Richtung des ungewöhnlichen gebrochenen Strahles erklären lasse, so ergebe doch die Theorie der Undulation nichts zur Erklärung derjenigen Beschaffenheit der Lichtstrahlen, welche man Polarisation nennt.<sup>1)</sup>

Fresnel seinerseits suchte die Berechtigung seiner Ansicht durchzusetzen. Bisher dachte man sich die Teilchen einer elastischen Flüssigkeit ohne Abstände und kompressibel. Fresnel hingegen nahm nunmehr einen aus diskreten Teilchen bestehenden Aether an und setzte voraus, dass die Abstände der Teilchen im Verhältnis zu ihrer Grösse bedeutend seien. Die in Vibration gesetzten Teilchen brauchen nicht, wie wir es uns bei elastisch-flüssigen Körpern denken, durch einen vermehrten Druck auf die in der Richtung des Strahles vorliegenden Teilchen zu wirken; wenn die Teilchen in einer zur Richtung des Strahles senkrechten Ebene eine Verrückung erleiden, so werden ohnedies auch die in der nächsten ihr parallelen Ebene eine neue Gleichgewichtslage suchen müssen, indem sie bestrebt sind, durch gewisse anziehende und abstossende Kräfte sich gegenseitig in ihrer Gleichgewichtslage zu erhalten. Jede Ebene, die man sich denkt, enthält in einem homogenen Mittel die Aetherteilchen gleichmässig verteilt und überträgt ihre Bewegung auf die vor ihr liegende, und so pflanzt sich, während die Teilchen in jeder Schicht nur in ihrer Ebene hin- und hergleiten, die Erschütterung, die Erregung des Lichtes dennoch in einer zur Ebene senkrechten Richtung fort.<sup>2)</sup>

Nachdem Fresnel so seine Vorstellungen über die Konstitution des Aethers fixiert hatte, suchte er auch die Folgerungen, welche Poisson aus seinen Gleichungen zog,

<sup>1)</sup> Fresnel, *œuvres* II, p. 195. Obige Stelle nach Gehler, Bd. VI, S. 353.

<sup>2)</sup> *Oeuvres*, I, p. 631.



abzuschwächen, indem er sagte, dass diese Gleichungen nur eine mathematische Abstraktion seien, weit davon entfernt, den wahren Vorgang in der Natur wiederzugeben. Diese Gleichungen setzten voraus, dass die Flüssigkeiten aus sich berührenden Teilchen bestehen, deren Zusammenpressung dem Drucke proportional sei. „Sie sind im Unrecht“, schreibt Fresnel an Poisson, „wenn Sie glauben, aus der Uebereinstimmung oder Nichtübereinstimmung der optischen Erscheinungen mit den aus Ihren Gleichungen gezogenen Schlüssen die Frage entscheiden zu können, ob das Licht in Schwingungen eines allverbreiteten Fluidums bestehe, dessen Natur Ihnen gar nicht bekannt ist. Ich zweifle selbst daran, ob Sie aus Ihren Gleichungen alle Schallerscheinungen ableiten können, obwohl Ihnen die Eigenschaften der Luft besser bekannt sind als die Eigenschaften des Aethers.“<sup>1)</sup>

Aus dem Angeführten geht hervor, dass in diesem Streite die verschiedene Bedeutung, welche beide Gegner dem Worte „fluide“ beilegte, eine reichliche Quelle von Missverständnissen war.<sup>2)</sup> Fresnel fasste nämlich das Wort in einem etwas unbestimmten Sinne, wie es die Physiker gewöhnlich taten, wenn sie das elektrische, magnetische oder Lichtfluidum bezeichnen wollten. Sie verstanden darunter einfach eine Flüssigkeit, die der Bewegung materieller Körper einen noch geringeren Widerstand entgegengesetzt als ein luftförmiges Mittel. Poisson dagegen verstand unter Fluidum stets ein Mittel, in welchem die Pressungen sowohl im Gleichgewichts- als im Bewegungszustande normal zu den flüssigen Elementen sind, auf welche sie wirken; auf diese Flüssigkeiten sind daher die hydrodynamischen Gleichungen anwendbar.

Diese Kontroverse mit Poisson war übrigens nicht ohne Erfolg. Fresnel drang mit der Hypothese der Transversalschwingungen durch, und Poisson schloss sich allmählich ähnlichen Ansichten an. Schon im Jahre 1823 betrachtete Poisson aus diskreten Teilchen bestehende Flüssigkeiten, zwischen denen sich weiter keine ponderable Materie befindet. Im Jahre 1830 sprach er von Transversalschwingungen fester Körper, machte aber die Einschränkung, dass man daraus keinen Schluss auf den Aether machen dürfe, der eine höchst feine Flüssigkeit sein müsse. Ein Jahr später fand sich diese Restriktion in der betreffenden Abhandlung nicht mehr. In seinem letzten wissenschaftlichen Werke zeigte Poisson, dass für sehr kleine und schnelle Schwingungen in Flüssigkeiten die für analoge Bewegungen in festen Körpern geltenden Gesetze nahezu anwendbar seien. Es hat demnach den Anschein, dass Poisson schliesslich ganz ins Lager der Undulationstheoretiker übergegangen, denen er anfangs mit so grosser Schärfe entgegengetreten war.<sup>3)</sup>

Eine weitere Schwierigkeit waren für die neue Anschauung die longitudinalen Schwingungen. Anfänglich mochte Fresnel gedacht haben, dass beide Schwingungsarten vorhanden seien. Darauf weist eine Stelle, wo er sagt, er habe mit Ampère den Gedanken gefasst, die Erscheinung der Polarisation durch die Annahme zu erklären, dass das polarisierte Licht nur in einer Ebene schwinde. Aber was sollte dann aus den Longitudinalschwingungen werden? Warum sollten diese durch den Vorgang der Polarisation zerstört werden, warum nicht wieder entstehen, wenn das polarisierte Licht bei schiefer Auftreffen auf eine Glasplatte reflektiert oder gebrochen wird? Diese Gedanken seien hinreichend gewesen, die Idee von Transversalschwingungen aufzugeben. Erst seit einigen

<sup>1)</sup> Oeuvres, II, p. 236.

<sup>2)</sup> Verdet sagt in der Einleitung zu Fresnels Werken: Toute la querelle sur la possibilité des vibrations transversales ne consiste quère que dans ce malentendu. Oeuvres de Verdet, Tom. I, p. 379.

<sup>3)</sup> Oeuvres de Fresnel, II, p. 238, Dasselbst ist die in dieser Angelegenheit zwischen Fresnel und Poisson geführte Korrespondenz angeführt.



Monaten<sup>1)</sup>, bemerkt Fresnel, sei er bei tieferem Nachdenken wiederum auf den Gedanken gekommen, es sei sogar wahrscheinlich, dass die Bewegung der Lichtwellen überhaupt in der Richtung der Wellenebene stattfinde und nicht senkrecht darauf, und dies sowohl für das natürliche wie für das polarisierte Licht.<sup>2)</sup> Das polarisierte Licht ist nach ihm dadurch charakterisiert, dass seine Schwingungen in einer bestimmten Ebene stattfinden; das natürliche Licht kann als polarisiertes Licht aufgefasst werden, dessen Schwingungsebene sich sehr schnell ändert; der Vorgang der Polarisation besteht nicht darin, die transversalen Schwingungen erst zu schaffen, sondern sie nach zwei zu einander senkrechten Ebenen zu zerlegen und diese beiden Wellensysteme zu trennen. Die Polarisationsebene ist nach Fresnel senkrecht zur Schwingungsebene.<sup>3)</sup>

Dass im gewöhnlichen Lichte keine longitudinalen Schwingungen vorhanden sind, hat Fresnel durch folgende Ueberlegung erkannt. Wären im natürlichen Lichte Longitudinalschwingungen vorhanden, so müssten sie durch die Polarisation zerstört werden. Es müsste dann im polarisierten Lichte eine Verminderung der lebendigen Kraft der Aetherteilchen, d. h. eine Schwächung des Lichtes stattfinden, was tatsächlich nicht der Fall ist. Folglich sind auch im gewöhnlichen Lichte nur Transversalschwingungen.<sup>4)</sup>

Fresnel stellte sich demnach auch hier auf den Boden der Erfahrung. Wie er bei Einführung der Transversalschwingungen zuerst aus den Tatsachen ihre Existenz als Notwendigkeit erkannte und dann erst eine mechanische Erklärung zu geben versuchte, so schloss er nun aus dem eben erwähnten Faktum (dass durch die Polarisation eine Schwächung des Lichtes nicht eintrete) auf die Nichtexistenz von Longitudinalschwingungen. Durch eine Hilfshypothese suchte er dann die Möglichkeit seiner Behauptung darzutun. Er setzte nämlich voraus, dass die Kraft, welche sich dem gegenseitigen Annähern der Aetherschichten widersetze, grösser sei als die, welche einem Gleiten der Schicht widerstehe, d. h., er nahm den Aether als sozusagen inkompressibel an.<sup>5)</sup>

Verdet weist darauf hin, Fresnel habe nicht gut getan, die Longitudinalschwingungen, die doch einmal vorhanden sein mussten, durch eine Hilfshypothese zu beseitigen, zu welcher er gar nicht mehr berechtigt war. Denn nachdem Fresnel den Aether als ein aus diskreten Teilchen bestehendes elastisches Medium vorausgesetzt, sei es ihm nicht mehr erlaubt gewesen, dem Aether Eigenschaften beizulegen, auf welche man die Gesetze der Hydrostatik und Hydrodynamik gründe (Inkompressibilität). In Wahrheit sollte der Aether nach den Vorstellungen Fresnels die Eigenschaften eines flüssigen und festen Körpers zugleich haben, und auch in der Folgezeit hat man diese wenig befriedigende Voraussetzung beibehalten müssen.

Andere Physiker haben später betreffs der Longitudinalschwingungen angenommen, dass sie wohl vorhanden seien, aber eine Wirkung auf die Retina nicht ausüben.<sup>6)</sup> Die Arbeiten Cauchys über die elliptische Polarisation durch Reflexion an Metallplatten und an gewissen durchsichtigen Körpern, sowie die Untersuchungen von Holtzmann und

<sup>1)</sup> Diese Abhandlung trägt kein Datum, sie wurde 1821 gedruckt, muss aber etwa um 1817 oder 1818 verfasst worden sein.

<sup>2)</sup> Oeuvres, I, 629, 630.

<sup>3)</sup> La lumière polarisée est celle dans laquelle les oscillations transversales s'exécutent constamment suivant une même direction, et la lumière ordinaire est la réunion et la succession rapide d'une infinité de systèmes d'ondes polarisées dans toutes les directions. L'acte de la polarisation ne consiste pas à créer ces vibrations transversales, mais à les décomposer suivant deux directions rectangulaires constantes, et à séparer les deux systèmes d'ondes ainsi produits . . . . Enfin, d'après la même théorie, le plan de polarisation est le plan perpendiculairement auquel s'exécutent les vibrations transversales. Oeuvres, II, p. 467, 468.

<sup>4)</sup> Ibid., II, p. 495, 496.

<sup>5)</sup> Ibid., I, p. 635; II, p. 315.

<sup>6)</sup> Schon Fresnel hatte diesen Gedanken ausgesprochen, machte aber die Bemerkung, diese Hypothese sei nicht notwendig. Oeuvres, II, p. 435.



Eisenlohr über Polarisation durch Beugung, haben es wahrscheinlich gemacht, dass der Aether zwar fähig ist, longitudinale Schwingungen fortzupflanzen, dass aber die Amplituden dieser Schwingungen weit rascher an Grösse abnehmen als die der transversalen, sodass die ersteren schon in geringer Entfernung von der Erregungsstelle unmerklich werden.<sup>1)</sup> Secchi sagt darüber: „Man kann im allgemeinen nicht leugnen, dass gleichzeitig auch longitudinale Schwingungen erfolgen müssen, und streng genommen ist es gar nicht möglich, diese Komponente zu entbehren, denn wie sollte sich ohne sie die Wellenbewegung in der Richtung des Strahles fortpflanzen? Es kann nun die Frage entstehen, ob sie, wenn sie wirklich existiert, sich in der Form von Licht bemerklich macht, oder welche andere Wirkung sie wohl hervorbringen kann? Ursache der Wärme kann sie nicht sein, da sich auch die Wärmestrahlen polarisieren lassen.“<sup>2)</sup> Einen schönen Gedanken hat L. Boltzmann unlängst ausgesprochen; er sagt: Wären die Röntgenstrahlen wirklich longitudinale Wellen des Lichtäthers, was zu glauben ihr Entdecker anfangs sehr geneigt war, und was noch heute durch keine einzige Tatsache widerlegt ist, so läge uns da ein eigentümlicher, in der Wissenschaft nicht einzig dastehender Fall vor. Die klassische theoretische Physik hatte ihre Ansicht über die Beschaffenheit des Lichtäthers vollkommen fertig. Nur eines fehlte noch, wie man glaubte, zur unumstösslichen Bestätigung ihrer Richtigkeit, nämlich die longitudinalen Aetherwellen; diese aber konnte man um keinen Preis finden. Jetzt, da bewiesen ist, dass der Lichtäther einen wesentlich anderen Bau haben muss, da er ja auch Vermittler der elektrischen und magnetischen Wirkungen ist, jetzt da die alte Ansicht über die Beschaffenheit des Lichtäthers abgetan ist, kommt man post festum ihrer ersehnten Bestätigung, der Entdeckung von Longitudinalwellen im Aether, so nahe.<sup>3)</sup>

Dass Fresnel in diesem Punkte nicht zu voller Wahrheit gelangt ist, wird sein Verdienst um die Einführung der Transversalschwingungen nicht schmälern. Es entsprach übrigens die Stellung in dieser Frage um die Existenz der Longitudinalschwingungen seinem Forschungsgange überhaupt. Die meisten Resultate auf dem Gebiete der Optik erlangte er auf dem Wege der Verallgemeinerung. Bei Aufstellung von mechanischen Theorien schaute er nicht so sehr auf ihre innere Wahrscheinlichkeit als vielmehr auf die Uebereinstimmung mit Tatsachen, die er als richtig anzusehen sich berechtigt glaubte.<sup>4)</sup> Dank seiner wunderbaren Intuition hat Fresnel auf vielleicht unrichtigem Wege doch das wahre Ziel gefunden.

Nun gestatten wir uns noch, die besonderen Voraussetzungen, welche Fresnel zur Erklärung der Reflexion, Brechung, Dispersion und Doppelbrechung machte, soweit sie uns hier interessieren, darzulegen.

In einem Briefe an Arago gibt Fresnel dem Gedanken Ausdruck, es möchten bei der Inflexion und Reflexion die Moleküle des Körpers selbst wiederum Vibrationen im Aether erzeugen, nachdem sie durch die einfallenden Lichtwellen dazu angeregt worden.<sup>5)</sup> Die Tatsache, dass das Licht nur in bestimmter, durch die Gesetze der Reflexion und Brechung gegebener Richtung zurückgeworfen und gebrochen wird, erklärt er in der Weise, dass die reflektierten und gebrochenen Wellen in jeder anderen Richtung sich gegenseitig durch Interferenz zerstören.<sup>6)</sup> Newton hätte zur Erklärung einer vollkommenen Reflexion einen vollkommen glatten Körper voraussetzen müssen; er bemerkte aber selber, dass ein solcher nicht herstellbar sei. Um nun doch die Tatsache einer hinreichend regelmässigen Reflexion, wie sie bei guten Spiegeln vorhanden ist, zu erklären, nahm er an,

<sup>1)</sup> Verdet-Exner, a a O., Bd. I, S. 353.

<sup>2)</sup> Secchi, Einheit der Naturkräfte, Bd. I, S. 330.

<sup>3)</sup> Physikalische Zeitschr. I, S. 85. 1899.

<sup>4)</sup> Oeuvres, II, p. 327.

<sup>5)</sup> Ibid., I, p. 72.

<sup>6)</sup> Ibid., I, p. 118.



dass die Lichtteilchen, bevor sie den spiegelnden Körper berühren, von gewissen Kräften zurückgeworfen würden. Anders Fresnel. Er zeigte, dass eine regelmässige Reflexion stattfindet, sobald die Unebenheiten der spiegelnden Fläche im Verhältnis zur Wellenlänge des auffallenden Lichtes klein sind.<sup>1)</sup> Dass wirklich der Grad der Regelmässigkeit der Reflexion von der Wellenlänge des auffallenden Lichtes abhängig ist, bewies Fresnel durch einen einfachen Versuch. Hält man nämlich einen weissen Gegenstand vor einen Spiegel, so erscheint das Spiegelbild, wenn die Strahlen senkrecht auffallen, etwas gerötet, weil die längeren roten Wellen stärker und regelmässiger reflektiert werden. Neigt man aber den Spiegel so, dass die Strahlen immer schiefer auftreffen, so wird die Farbe des Spiegelbildes immer mehr dem Gegenstand entsprechend. Der Grund dafür liegt darin, dass die Unebenheiten des Spiegels in bezug auf die Wellenlänge um so kleiner werden, je schiefer die Wellen auffallen.<sup>2)</sup>

In seinen späteren Arbeiten hat Fresnel die Reflexion und Brechung polarisierten Lichtes viel genauer und vollständiger dargestellt. Dabei ging er von folgenden Hypothesen aus:

- 1) Das Licht ist eine transversale Schwingungsbewegung des Aethers.
- 2) Die kinetische Energie der einfallenden Welle ist gleich der Summe der kinetischen Energieen der reflektierten und gebrochenen Welle.<sup>3)</sup> Bezeichnet  $A$  die Amplitude,  $\lambda$  die Wellenlänge,  $T$  die Periode der Schwingung und  $\rho$  die Dichte des Aethers, ist ferner die Breite einer ebenen Welle  $a$ , ihre Höhe  $\beta$ , so lässt sich die Energie pro Wellenlänge darstellen durch den Ausdruck

$$\frac{\pi^2 A^2 \rho \lambda b h}{T^2}$$

Die zweite Hypothese liefert daher die Gleichung

$$\rho (A^2 - A_1^2) \sin \alpha \cos \alpha = \rho_2 A_2^2 \sin \beta \cos \beta \quad (a)$$

wo nunmehr  $\rho_1$  und  $\rho_2$  die Dichte des Aethers in 2 verschiedenen Medien,  $A$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  die Amplitude der einfallenden, reflektierten und gebrochenen Welle,  $\alpha$  und  $\beta$  den Einfallswinkel und Brechungswinkel bezeichnen.

- 3) Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes kann durch die Formel

$$v = \sqrt{\frac{e}{\rho}}$$

gegeben werden, wo  $e$  die Elastizität des Aethers bezeichnet.

4. Die Elastizität des Aethers ist in verschiedenen Medien konstant, die Dichte des Aethers aber verschieden. Aus der 3. und 4. Hypothese folgt also, dass

$$v_1 : v_2 = \sqrt{\frac{e}{\rho_1}} : \sqrt{\frac{e}{\rho_2}} = \sqrt{\rho_2} : \sqrt{\rho_1}$$

oder

$$\frac{v_1^2}{v_2^2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} = n^2 = \frac{\sin^2 \alpha}{\sin^2 \beta}$$

Gleichung (a) wird daher allgemein:

$$(A^2 - A_1^2) \cos \alpha \sin \beta = A_2^2 \sin \alpha \cos \beta$$

- 5) Die Schwingungen in der Trennungsebene sind kontinuierlich, senkrecht dazu aber nicht.

<sup>1)</sup> Ibid., I, p. 30.

<sup>2)</sup> Ibid., I, p. 692.

<sup>3)</sup> Diese Hypothese hat wohl nur Gültigkeit für den Fall, dass keine Absorption stattfindet. Anderenfalls wäre die kinetische Energie der reflektierten und gebrochenen Welle um einen der entstandenen Wärmemenge äquivalenten Betrag kleiner.



Fällt nun die Schwingungsrichtung des einfallenden Strahles in die Trennungsebene, so findet man für die Amplituden der reflektierten und gebrochenen Welle:

$$A_1 = - \frac{\sin(a-\beta)}{\sin(a+\beta)} A; \quad A_2 = \frac{2 \cos a \sin \beta}{\sin(a+\beta)} A$$

Desgleichen ist für die Einfallsebene

$$A_1 = \frac{\operatorname{tg}(a-\beta)}{\operatorname{tg}(a+\beta)} A; \quad A_2 = \frac{2 \cos a \sin \beta}{\sin(a+\beta) \cos(a-\beta)} A.$$

Schwingt der einfallende Strahl weder in der Einfalls- noch in der Trennungsebene, sondern macht die Schwingungsrichtung der Aetherteilchen mit der Einfallsebene einen Winkel  $\varphi$ , so findet man durch Zerlegung der Schwingung für die Einfallsebene

$$A_1 = \frac{\operatorname{tg}(a-\beta)}{\operatorname{tg}(a+\beta)} A \cos \varphi; \quad A_2 = \frac{2 \cos a \sin \beta}{\sin(a+\beta) \cos(a-\beta)} A \cos \varphi$$

und für die Trennungsebene:

$$A_1 = - \frac{\sin(a-\beta)}{\sin(a+\beta)} A \sin \varphi; \quad A_2 = \frac{2 \cos a \sin \beta}{\sin(a+\beta)} A \sin \varphi.$$

Sind  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  die Schwingungsrichtungen des reflektierten und gebrochenen Lichtes mit der Einfallsebene, so ist

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = - \frac{\cos(a-\beta)}{\cos(a+\beta)} \operatorname{tg} \varphi \quad (b)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \cos(a-\beta) \operatorname{tg} \varphi.$$

Da in Gleichung (b)  $\varphi$  und  $\varphi_1$  verschieden sind, so folgt, dass die Schwingungsrichtung des reflektierten Lichtes gedreht ist.

Ist  $a + \beta = \frac{\pi}{2}$ , was der Fall ist, wenn  $\operatorname{tg} a = n^1$ , so wird  $\varphi_1 = 90^\circ$ , was auch  $\varphi$  sein mag. Damit haben wir einen der bekanntesten Sätze in Fresnels Lichttheorie, der folgendermassen ausgesprochen werden kann: Wird natürliches Licht ( $\varphi$  variabel; man vergleiche Fresnels Definition des natürlichen Lichtes) unter einem solchen Einfallswinkel gespiegelt, dass  $\operatorname{tg} a = n$ , so ist das reflektierte Licht stets polarisiert, und zwar liegt nach Fresnel (Gleichung b) die Schwingungsrichtung des polarisierten Lichtes senkrecht zur Einfallsebene. Und da Fresnel die Einfallsebene als Polarisationssebene bezeichnet, so folgt daraus, dass nach ihm das polarisierte Licht senkrecht zur Polarisationssebene schwingt.

Bekanntlich ist Neumann dadurch, dass er die Dichte des Aethers in verschiedenen Medien als konstant, dagegen die Elastizität als veränderlich voraussetzte, zur Folgerung gelangt, dass die Schwingungsrichtung des polarisierten Lichtes in der Polarisationssebene liege. Die Frage über die Schwingungsrichtung des polarisierten Lichtes ist seitdem immer offen geblieben, obwohl es nicht an Versuchen fehlte, selbst durch das Experiment eine Entscheidung herbeizuführen.

Anfänglich wollte man den von Otto Wiener<sup>2)</sup> angestellten Untersuchungen Beweiskraft zu Gunsten Fresnels beilegen. Es wurde aber darauf hingewiesen,<sup>3)</sup> dass jetzt, nach Annahme der elektromagnetischen Lichttheorie diese Versuche weder für Fresnel noch für Neumann entscheidend sind; denn nach dieser Anschauung über das Licht sind stets zwei aufeinander senkrechte Schwingungen vorhanden; die eine eine Schwingung elektrischer, die andere eine Schwingung magnetischer Kraft. Im polarisierten Licht ist deshalb die eine Schwingung in der Einfallsebene (Polarisationssebene), die andere senkrecht dazu. Die Frage ist jetzt lediglich die: welche von diesen beiden Schwingungen

<sup>1)</sup> Gesetz von Brewster 1815. Als Polarisationswinkel bezeichnet man das Komplement des Einfallswinkels.

<sup>2)</sup> Wiedemanns Ann. Bd. 40, S. 203–243.

<sup>3)</sup> Ibid. Bd. 41, S. 154–160; Bd. 43, S. 177–180.



nehmen wir als Licht wahr? Ist es die zur Einfallsebene senkrechte Schwingung elektrischer Kraft, so hat Fresnel recht, und es scheinen wirklich einige Untersuchungen die Sache in diesem Sinne entscheiden zu wollen, z. B. die von Klemenčič, aus denen sich ergab, dass für die elektrischen Schwingungen Hertz'scher Wellen die Fresnel'schen Gleichungen gelten.<sup>1)</sup>

Fresnel untersuchte auch die Frage, wovon die Dispersion des Lichtes abhängt.

Poisson war bei seinen Untersuchungen über die Fortpflanzung der Schallwellen zum Schlusse gekommen, dass verschieden lange Wellen sich mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzen. Dabei war er von der Voraussetzung ausgegangen, dass jede unendlich dünne Schicht des Mediums nur auf die sie unmittelbar berührende einwirke, mit anderen Worten, dass die Strecke, auf welche die beschleunigende Kraft wirkt, im Verhältnis zur Wellenlänge unendlich klein sei. Wäre nun bei den Lichtwellen dasselbe der Fall, so würde niemals eine Dispersion eintreten. Fresnel hat aber darauf hingewiesen, dass die Verhältnisse beim Schall und beim Licht ganz verschiedene sein müssen. Die von Poisson gemachte Voraussetzung mag wohl bei den relativ grossen Schallwellen Geltung haben, nicht aber für die viel kleineren Lichtwellen, wo man annehmen muss, dass die Kraft, welche die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in einem brechenden Medium bestimmt, sich auf Entfernungen erstreckt, die im Verhältnis zur Wellenlänge des Lichtes nicht mehr als unendlich klein angenommen werden dürfen. Daraus folgert Fresnel, dass die längeren Wellen weniger verlangsamt, d. h. weniger gebrochen werden als die kürzeren.<sup>2)</sup>

Offenbar muss man aber unterscheiden zwischen der Fortpflanzung des Lichtes im freien und im intramolekularen Aether. Schon Newton hatte dem Astronomen Flammsteed die Aufgabe gestellt, durch Beobachtung der Jupitertrabanten zu ermitteln, ob im leeren Raume eine Dispersion des Lichtes stattfindet. Die später unter bedeutend günstigeren Bedingungen von Arago angestellten Versuche ergaben auch ein negatives Resultat. Es beträgt nämlich die Differenz der Fortpflanzungsgeschwindigkeit verschiedener Lichtwellen nicht  $10^{-5}$  ihres eigenen Betrages, weshalb man mit Recht schliessen kann, dass im freien Aether keine Dispersion stattfindet.<sup>3)</sup>

Fresnel selbst nahm an, dass die Elastizitätskraft des freien Aethers eine sehr begrenzte Wirkungssphäre habe, dass also hier die Voraussetzung Poissons zutrefte, im freien Aether also eine Dispersion nicht stattfindet.<sup>4)</sup>

Anfänglich hatte Fresnel zur Erklärung der Brechung nur die verschiedene Dichte des Aethers angenommen; allein durch die Erscheinung der Doppelbrechung und Dispersion wurde er zur Annahme geführt, dass die Moleküle der ponderablen Materie von Einfluss sein müssten.<sup>5)</sup>

Spätere Untersuchungen haben ergeben, dass die verschiedene Dichte des Aethers allein die Brechung nicht bestimmt, und dass es wesentlich die Mitbewegung der ponderablen Moleküle ist, welche die Brechung bedingt; dementsprechend besteht die grössere spezifische Dichtigkeit der Medien darin, dass zu den im freien Raume schwingenden Aethermolekülen diejenigen des Körpers hinzutreten. Nimmt man nach Fresnel an, dass die Dichtigkeit des intramolekularen Aethers grösser sei als die des freien Aethers, so folgt

<sup>1)</sup> Wiedem. Ann. Bd. 45, S. 62. — Vgl. Wüllner, Bd. IV. S. 717. — Fresnel selbst scheint der Sache nicht so grosse Bedeutung beigelegt zu haben; er sagt diesbezüglich: Nous admettons donc que les vibrations d'un rayon polarisé s'exécutent perpendiculairement à son plan de polarisation, plutôt pour fixer les idées que pour établir un théorème dont nous ayons besoin, puisque tout ce que nous allons dire serait également vrai, quand les vibrations lumineuses s'exécutaient parallèlement au plan de polarisation. Oeuvres, II. p. 495.

<sup>2)</sup> Oeuvres, II, p. 89, 90.

<sup>3)</sup> Verdet-Exner, Bd. II, S. 12.

<sup>4)</sup> Oeuvres, II, p. 90.

<sup>5)</sup> Ibid, I, p. 694.



daraus unmittelbar, dass die Aethermoleküle im freien Raume einen grösseren Abstand haben als in den durchsichtigen Medien. Da nun die Wellen im durchsichtigen Medium stets verkürzt werden, so folgt weiter, dass das Verhältnis zwischen der Wellenlänge und dem Abstand der Aethermoleküle im freien Raume und im intramolekularen Aether annähernd dasselbe ist, dass also in durchsichtigen Körpern und im freien Raume die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in derselben Weise von der Wellenlänge abhängt. Und da nun im freien Raume eine Dispersion des Lichtes nicht wahrgenommen werden konnte, so ergibt sich, dass auch die grössere Aetherdichte in den durchsichtigen Medien nicht allein die Ursache der Dispersion sein kann.<sup>1)</sup>

Die Arbeiten Fresnels auf dem Gebiete der Doppelbrechung berücksichtigen wir nur insoweit, als sie unsere Darstellung berühren. Hier sind es hauptsächlich zwei Voraussetzungen, welche er macht; sie betreffen die Schwingungsrichtung des Lichtes und die Konstitution des doppelbrechenden Mediums.

Huygens war es gelungen, unter Voraussetzung von Longitudinalwellen die Doppelbrechung zu erklären, aber von der mit der Doppelbrechung stets verbundenen Polarisation des Lichtes konnte er nicht Rechenschaft geben. Fresnel dagegen legte mit dem grössten Erfolg allen diesbezüglichen Forschungen die Transversalschwingungen zu Grunde.<sup>2)</sup>

Sei  $A$  die Amplitude eines geradlinig polarisierten Strahles; eine doppelbrechende Krystallplatte von der Dicke  $d$  zerlege den Strahl in die Komponenten  $p=A \sin \varphi$  (Richtung des ordentlichen Strahles) und  $q=A \cos \varphi$  (Richtung des ausserordentlichen Strahles), wo  $\varphi$  den Winkel bezeichnet, den die Schwingungsrichtung des einfallenden Lichtes mit der Ebene einschliesst, die durch den einfallenden Strahl und die Richtung der Hauptachse bestimmt ist. Sind in einem Punkte  $\xi$  und  $\eta$  die Ausweichungen ( $\eta$  in Richtung der Hauptachse), so ist der Ort eines schwingenden Aetherteilchens gegeben durch die Gleichung

$$\frac{\xi^2}{p^2} + \frac{\eta^2}{q^2} - 2 \frac{\xi\eta}{pq} \cos \vartheta = \sin^2 \vartheta,$$

wenn

$$\vartheta = \frac{2\pi}{T} \left( \frac{d}{v_1} - \frac{d}{v_2} \right).$$

Es beschreibt also das Lichtteilchen oder das Ende des charakteristischen Vektors im allgemeinen einen Kegelschnitt. Haben  $v_1$  und  $v_2$  die gewöhnliche Bedeutung, so hat man geradlinig polarisiertes Licht, wenn:

$\vartheta = \pi$  oder  $2\pi$ ; und die entsprechende Plattendicke

$$= \frac{v_1 v_2}{v_2 - v_1} \frac{T}{2} \text{ oder } = \frac{v_1 v_2}{v_2 - v_1} T \text{ ist;}$$

elliptisch polarisiertes Licht, wenn:

$$\vartheta = \frac{\pi}{2} \text{ oder } \frac{3}{2} \pi \text{ und die entsprechende Plattendicke}$$

$$= \frac{v_1 v_2}{v_2 - v_1} \frac{T}{4} \text{ oder } \frac{v_1 v_2}{v_2 - v_1} \frac{3}{4} T;$$

zirkular polarisiertes Licht, wenn:

$$\vartheta = \frac{\pi}{2} \text{ oder } \frac{3}{2} \pi$$

und die Plattendicke wie beim elliptisch polarisierten Licht, und ausserdem

$$\varphi = \frac{\pi}{4} \text{ ist.}$$

<sup>1)</sup> Vgl. Wüllner, Physik, Bd. IV, S. 127 ff.

<sup>2)</sup> Oeuvres, II. p. 467, 468. Für die mathematischen Entwicklungen benützten wir die Vorlesungen von Prof. Dr. Daniëls über die Physik des Aethers.



Bezüglich der Beschaffenheit des doppelbrechenden Mediums äusserte sich Fresnel in folgender Weise: Alle Krystalle weisen Spaltbarkeit nach verschiedenen Richtungen auf. Es ist also die Kraft, welche einer Trennung der Teile des Krystalls widersteht, nach verschiedenen Richtungen verschieden gross, und man ist daher berechtigt, anzunehmen, dass auch die Elastizität nach verschiedenen Richtungen verschieden sei. Denn ohne die Voraussetzung, dass die von den Teilchen des Krystalls ausgeübten Wirkungen nach verschiedenen Richtungen verschieden gross sind, wäre es gar nicht möglich, diese bestimmte Anordnung der Teilchen, die man Krystallisation nennt, zu begreifen.<sup>1)</sup>

Unter einem doppelbrechenden Medium versteht Fresnel ein solches, in dem die Elastizität nach verschiedenen Richtungen verschieden gross ist. Unter Elastizität versteht er aber die Kraft, welche bei der Verschiebung einer Schicht geweckt wird und ihrerseits auch eine Verschiebung der folgenden Schicht verursacht. Dabei wird stets vorausgesetzt, dass jede Schicht in ihrer eigenen Ebene senkrecht zum Strahl sich verschiebe, ohne in der Richtung des Strahles einen Druck auszuüben, mit anderen Worten, dass keine longitudinalen Wellen erzeugt werden. Ferner sollen die Exkursionen der Teilchen in ihrer Ebene in Bezug auf die Entfernung zweier benachbarten Teilchen sehr klein sein.

Nun drängt sich die Frage auf, ob beim Durchgang des Lichtes durch einen durchsichtigen Körper die Moleküle der ponderablen Materie auch an der Bewegung teilnehmen, oder ob nur die Teilchen des intramolekularen Aethers wirksam sind. Fresnel selbst betrachtet die Frage als ungelöst, glaubt aber, seine Voraussetzungen würden auch dann noch ihre Geltung bewahren, wenn der intramolekulare Aether allein Träger der Lichtbewegung in Krystallen wäre. Denn die mit dem Krystall schon gegebene besondere Anordnung der ponderablen Teilchen muss auf die Elastizitätsverhältnisse des intramolekularen Aethers auch von Einfluss sein.

Ohne also die Frage zu entscheiden, ob das ganze brechende Mittel oder nur ein Teil desselben, der eingeschlossene Aether, an der Lichtbewegung teilnehme, betrachtet Fresnel den schwingenden Teil desselben, welcher es auch sein mag, und die gegenseitige Abhängigkeit seiner Moleküle soll als Elastizität des Mittels bezeichnet werden.<sup>2)</sup>

Wird ein Molekül aus seiner Ruhelage gebracht und kehrt es in der eigenen Richtung wiederum in die Ruhelage zurück, so ist diese Richtung selbst eine Elastizitätsachse.<sup>3)</sup> Die Elastizitätsachsen sind zugleich die wahren Krystallachsen.

Darauf beweist Fresnel den Satz: „Ist ein beliebiges System materieller Punkte im Gleichgewicht, so gibt es für jeden Punkt drei aufeinander senkrechte Elastizitätsachsen.“ Setzt man dann noch voraus, dass diese Elastizitätsachsen durch den ganzen Krystall einander parallel sind (drei Richtungen) und dass bei kleinen Verschiebungen in diesen drei Richtungen die Widerstände nicht gleich sind: so reicht dies hin, um alle Eigenschaften der ein- und zweiachsigen Krystalle zu erklären.<sup>4)</sup>

Weiter gehen wir auf diesen Gegenstand nicht ein, da wir nur die von Fresnel gemachten Voraussetzungen über die Konstitution des Mittels, soweit der Aether dabei beteiligt ist, darzulegen hatten. Zudem ist Fresnels Theorie der Doppelbrechung zum Teil noch die herrschende, also jedem Physiker bekannt.

Fresnel hat auch die zum Teil noch akute Frage, ob der Aether an der Bewegung der Erde teilnehme, besprochen.

<sup>1)</sup> Oeuvres, II., 440, 441.

<sup>2)</sup> Ibid. II., p. 468

<sup>3)</sup> J'appelle axes d'élasticité du milieu les directions suivant lesquelles la molécule est repoussée dans la direction même de son déplacement.

<sup>4)</sup> Ibid. II., p. 469.



Arago hatte Beobachtungen angestellt über den Einfluss der Erdbewegung auf die Brechung des Fixsternlichtes und fand, dass das Licht jener Sterne, nach welchen die Erde sich hinbewegt, genau so gebrochen wird wie das Licht der Sterne, von denen die Erde sich entfernt.<sup>1)</sup> Er forderte auf dieshin von Fresnel, dass er diese Tatsache mit der Undulationstheorie in Einklang bringe. Zu gleicher Zeit studierte Fresnel die Erscheinung der Aberration des Fixsternlichtes und erkannte, dass beide Erscheinungen ein verschiedenes Verhalten des Aethers verlangen. Würde man nämlich voraussetzen, die Erde teile dem Aether ihre eigene Geschwindigkeit mit, so wäre wohl die Konstanz des Brechungsexponenten trotz der Bewegung der Erde, aber nicht die Aberration des Fixsternlichtes erklärbar.

Fresnel gesteht in einem Schreiben an Arago, wo er diese Erscheinungen bespricht, dass er die Aberration bislang nur unter der Voraussetzung habe erklären können, dass der Aether frei durch die Erde gehe, dass ihm daher durch die Bewegung der Erde nur eine geringe Geschwindigkeit mitgeteilt werde. Fresnel macht sich dann selbst den Einwurf: unter der gemachten Voraussetzung müsste die Erde durchsichtig sein. Er weist aber auf den grossen Unterschied hin, der zwischen einem Aetherstrom und der Lichtbewegung besteht. Bei einem Aetherstrom bewegt sich die Masse des Aethers örtlich, bei der Lichtbewegung aber pflanzt sich nicht der Aether, sondern nur die schwingende Bewegung fort; es ist deshalb wohl möglich, dass der Aether einen Körper durchdringen kann, während er doch undurchsichtig ist, weil die Wellenbewegungen im Aether, auf welche allein das Sehorgan reagiert, sich durch Interferenz zerstören.

Fresnel nahm sodann an, dass der Aether um die ponderablen Moleküle der brechenden Körper kondensiert sei und dass, wenn diese Körper sich bewegen, nicht die ganze in ihnen enthaltene Aethermenge an der Bewegung teilnehme, sondern nur der Ueberschuss über jenes Quantum, welches ein gleiches Volumen des leeren Raumes enthält.<sup>2)</sup> Die Geschwindigkeit des in den Körpern enthaltenen Aethers soll sich zur Geschwindigkeit der Körper selbst verhalten, wie der genannte Ueberschuss der Aetherdichte in den Körpern zur Dichte des Aethers in den Körpern. Bezeichnet  $v$  die Geschwindigkeit des intramolekularen Aethers,  $v_1$  die Geschwindigkeit des Körpers, und ist  $\Delta$  der genannte Ueberschuss, so ist, wenn die Dichte des freien Aethers gleich 1 gesetzt wird

$$\frac{v}{v_1} = \frac{\Delta}{1 + \Delta}$$

oder

$$v = \frac{v_1 \Delta}{1 + \Delta}$$

Wird nun angenommen, dass  $\Delta$  kleiner als  $10^{-3}$  sei, so wäre die Geschwindigkeit des Aethers für einen Körper am Aequator kleiner als 0,46 m/sec. d. h. im Verhältnis zur Geschwindigkeit der Erde sehr klein, und damit wäre die Aberration des Fixsternlichtes vereinbar.

Um zu ermitteln, ob die verschiedene Dichte des Mediums auf die Aberration von Einfluss sei, hatte schon Boscovich<sup>3)</sup> vorgeschlagen, das Fernrohr mit Wasser zu füllen. Fizeau führte diesen Vorschlag aus und fand, dass die Dichte des Mediums die Aberration nicht beeinflusse, und dass die Tatsachen mit der Voraussetzung Fresnels in Einklang seien.<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> Aragos Werke, Bd. 1, S. 125.

<sup>2)</sup> Unter leerem Raum verstehen wir hier einen von ponderabler Materie freien Raum.

<sup>3)</sup> Opera pertinentia ad opticam et astronomiam. Tom. II. p. 257.

<sup>4)</sup> Verdet, oeuvres, IV, p. 703—708.



Die andere Frage über die Konstanz des Brechungsexponenten wurde von Fresnel durch die Annahme gelöst, dass die totale in der Volumeinheit eines Körpers enthaltene Aethermenge dem Brechungsexponenten proportional sei, also umgekehrt proportional dem Quadrate der Geschwindigkeit. Somit würde die Menge des mitgenommenen Aethers (Correptionscoëfficient) dem Brechungsvermögen eines Körpers proportional sein, wodurch alle Erscheinungen, die in der raschen Bewegung eines Körpers ihren Grund haben, erklärt werden könnten.<sup>1)</sup>

Später wurde für Wasser ein Einfluss der Bewegung auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes durch Versuche endgiltig bewiesen und damit auch die Fortführung (Correption) des Aethers wahrscheinlich gemacht. Die erwähnten Versuche beweisen aber unmittelbar nur eine Fortführung des Lichtes durch stoffliche Medien und können deshalb die Streitfrage, ob der Aether ruhe oder mit der wägbaren Materie sich bewege, nicht entscheiden. Für Luft haben Michelson und Fizeau eine solche Beeinflussung experimentell festgestellt. Während jedoch nach ersterem der Aether fast ganz ( $\frac{3}{4}$  bis  $\frac{5}{6}$ ) mitgenommen werden soll, geht er nach letzterem beinahe gar nicht mit.<sup>2)</sup>

In neuester Zeit haben die Fragen, welche die Aberration des Lichtes und Bewegung des Aethers betreffen, wiederum aktuelles Interesse gewonnen. Die beiden Haupttheorien sind die von Maxwell-Hertz und von H. A. Lorentz. Erstere nimmt an, dass der Aether stets an der Materie haften, die andere hingegen betrachtet den Aether als ruhend und nur die aus Ionen zusammengesetzte ponderable Materie als bewegt. Zu diesen Theorien kommt eine allgemeinere Bearbeitung des Problems durch G. F. Walker.<sup>3)</sup>

Damit stehen wir am Ende unserer Arbeit. Während der Abfassung hat der Gedanke immer mehr Platz gegriffen, dass der Gegenstand, die Darstellung der Aetherhypothesen in ihrer geschichtlichen Entwicklung, eine ganz eigene Beschaffenheit habe. Wollte man nämlich nur die Eigenschaften des Aethers darlegen, so weit sie durch die wissenschaftlichen Arbeiten von zwei Jahrhunderten uns nahe gelegt worden sind, so würde dies wenig Raum in Anspruch nehmen. Es hängt das, wie schon von Grosse<sup>4)</sup> bemerkt worden ist, mit einem logischen Gesetze zusammen. Je grösser nämlich der Umfang eines Begriffes ist, desto geringer ist sein Inhalt. Wir können darum nur so wenig Positives über die Substanz des Aethers sagen, weil wir so vielerlei Befähigungen verschiedenster Art von ihm verlangen.

Wenn wir nun dennoch etwas mehr geschrieben haben, so leitete uns dabei die Ueberzeugung, dass man die Aetherhypothesen nicht darlegen könne, ohne bisweilen die Entwicklungsgeschichte der Undulationstheorie beizuziehen und jene Ereignisse zu berücksichtigen, welche entweder neue Voraussetzungen über den Aether bedingten oder selbst eine Folge von bereits über den Aether gemachten Voraussetzungen waren.

Fassen wir nun noch den Charakter der Aetherhypothesen des 19. Jahrhunderts ins Auge, so erkennen wir unschwer, dass sie bis Faraday wesentlich dasselbe Gepräge haben. Der Aether ist atomistisch; die unvermittelte Fernwirkung scheint keine Schwierigkeiten bereitet zu haben. Das Streben der Mathematiker und Physiker ging dahin, die Undulationstheorie auf den von Fresnel geschaffenen Grundlagen weiterzuführen. Mit Faraday aber treten die An-

<sup>1)</sup> Fresnel, Oeuvres, II, p. 627 ff.

<sup>2)</sup> Dressel, Lehrbuch d. Phys. S. 778.

<sup>3)</sup> Wir verweisen auf ein Referat über diese Arbeit in Physikalische Zeitschr. II, S. 30, 31. 1900.

<sup>4)</sup> Der Aether und die Fernkräfte, S. 10, 11.



sichten über den Aether in eine neue Entwicklungsphase. Der Begriff einer unvermittelten Fernwirkung wird aufgegeben, und damit ergibt sich die Forderung eines den Raum kontinuierlich erfüllenden Aethers. Doch fehlt es auch seither nicht an Vertretern einer atomistischen Auffassung, die dann die Aetherteilchen sich unmittelbar berühren lassen oder weitere Zwischenräume annehmen.

Durch die Arbeiten von Maxwell, W. Thomson (Lord Kelvin), Stokes, Lodge, Hertz und Anderen hat der Aether eine Bedeutung gewonnen wie kaum je zuvor.<sup>1)</sup> Nach diesen neuesten Anschauungen ist der Aether eine ausserordentlich feine Substanz. Thomson gelangte bei Berechnung der oberen Grenze der Dichte des Aethers zur Zahl  $10^{-22}$ . Der Aether wird ferner inkompressibel trotz des merkwürdigen und peinlichen Widerspruchs, der darin liegt, dass die Gestirne sich durch ein solches Medium ohne Reibung bewegen sollen. Er erfüllt den ganzen unermesslichen Weltraum, durchdringt alle Körper und verhält sich, um das deutlichste Bild anzuwenden, wie eine feine und doch zähe Gallerte. Er ist schliesslich ohne jede Struktur, d. h. er besteht nicht, wie wir das von der ponderablen Materie annehmen, aus Molekülen und Atomen. In seiner Masse sind alle Körper eingebettet, sie schweben in ihm weich und sanft wie etwa kleine leichte Körperchen in einer flüssigen Leimlösung.

Nach Lord Kelvin bestehen auch die Atome der ponderablen Materie aus Wirbeln im Aether, die selbst aus Aether gebildet sind. Diese Atome sind fest infolge der Bewegung der Wirbelmaterie, und eben deswegen verhält sich der Aether wie ein elastischer starrer Körper. Der Aether ist ferner eine reibungslose Flüssigkeit, darum haben seine Wirbel immerwährende Dauer. Die ponderable Materie bildet dieser Anschauung zufolge einen Teil des Aethers, welcher sich infolge seiner Wirbelbewegung vom Aether differenziert, ohne jedoch in der Substanz von ihm verschieden zu sein. Wir hätten nach dieser Ansicht, wie Lodge sagt, „eine einzige Substanz, ununterbrochen, und alle Räume erfüllend, die als Licht Schwingungen vollführt, in positive und negative Elektrizität sich spalten kann, als Wirbel die Materie bildet und durch Kontinuität jede Wirkung, deren die Materie fähig ist, überträgt.“ Wir hätten in diesem Falle nicht nur eine Einheit der Energie, sondern auch eine Einheit des Stoffes, worauf H. Hertz mit den eingangs angeführten Worten hinwies: „Der heutigen Physik liegt die Frage nicht mehr ferne, ob nicht alles, was ist, aus dem Aether geschaffen sei.“

<sup>1)</sup> Die folgende Charakteristik der neuesten Anschauungen über den Aether ist der wissenschaftlichen Beilage der Prager Bohemia entnommen. 1900 Nr. 245.



## Berichtigungen.

Seite	5	Zeile	2 v. u.	lies das Licht	statt dass Licht.
„	31	„	20 v. o.	„ .. Welle b, .. Höhe h	„ .. Welle $\alpha$ , .. Höhe $\beta$ .



